



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA KRYTU KLOUBU PŘÍVĚSNÉHO VOZÍKU

MANUFACTURING OF TRAILER CONNECTING JOINT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Vahala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jiří Vahala
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jan Řiháček, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba krytu kloubu přívěsného vozíku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh nástroje pro výrobu krytu připojovacího kloubu přívěsného vozíku. Součástka je prostorového tvaru s otvory a bude vyráběna technologií plošného tváření. Na tuto problematiku bude také zaměřena literární rešerše i výpočty potřebné pro návrh a kontrolu nástroje. Vzhledem k povaze řešené problematiky se rovněž předpokládá možné využití numerické simulace.

Cíle diplomové práce:

- zhodnocení technologičnosti,
- rozbor možných výrobních metod,
- návrh nástroje včetně nezbytných technologických výpočtů,
- provedení technicko–ekonomického zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. Technológia tvárnenia. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření. Plošné a objemové tváření. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

LOGAN, Daryl L. A first course in the finite element method. United States: Cengage Learning, 2007, 808 s. ISBN 978-0-534-55298-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

VAHALA Jiří: Výroba krytu kloubu přívěsného vozíku.

Práce předkládá návrh technologie výroby krytu kloubu přívěsného vozíku z hlubokotažného ocelového plechu jakosti 11 320. Na základě literární studie problematiky hlubokého tažení a výpočtů byl navržen postupový nástroj složený ze čtyř operací. K vysunutí součástí jsou použity spodní vyhazovače. Nástroj je především z nenormalizovaných komponent a je navrženo pro použití na hydraulickém lisu CTH 250, s nominální tažnou silou 2 500 kN. Tažník a tažnice jsou vyrobeny z nástrojové oceli jakosti 19 436 tepelně zpracované podle výkresové dokumentace. Technicko – ekonomickém hodnocení bylo zaměřeno na náklady při tváření, jejichž celková hodnota je 2 922 893 Kč.

Klíčová slova: Ocel 11 320, hluboké tažení, nerotační výtah, hydraulický lis.

ABSTRACT

VAHALA Jiří: Manufacturing of Trailer Connecting Joint.

The project elaborated design of technology production of the trailer connecting joint from the deep drawing sheet iron 11 320. Pursuant to of the literary pursuit a problem of the deep drawing and calculation was designed progressive tool concatenate four operations. The lower ejectors are using for ejecting components. The drawing instrument especially made of non-standardised components and it is designed for use on a hydraulic press CTH 250, with nominal tensile force 250 kN. Drawing punch and drawing die are produced from alloyed instrumental steel 19 436 heat-worked according to drawing documentation. The technical and economical evaluation was focused on the forming cost, which is 2 922 893 CZK in total.

Keywords: 11 320 steel, deep drawing, non-rotary drawing, hydraulic press.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAHALA, Jiří. *Výroba krytu kloubu přívěsného vozíku* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124297>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 26.6.2020

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval rodině za podporu při studiu.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Variantní řešení	11
2 TECHNOLOGIE TAŽENÍ	15
2.1 Určení velikosti polotovaru	18
2.2 Mezní stupeň tažení a počet tažných operací	20
2.3 Poloměry zaoblená tažných hran a tažená mezera	21
2.4 Volba přídržovače	22
2.5 Síla a práce	23
2.6 Nástroje	24
2.6.1 Tažníky	26
2.6.2 Tažnice	26
2.6.3 Brzdná žebra	27
2.6.4 Přídržovač	28
2.6.5 Materiály tažných nástrojů	29
2.7 Stroje	29
2.8 Maziva	31
2.9 Technologické aplikace tažení plechu	31
2.10 Numerická simulace	33
2.11 Technologičnost	34
3 NÁVRH VÝROBY	35
3.1 Velikost polotovaru	35
3.2 Nástřihový plán	38
3.3 Součinitel tažení a počet tažných operací	39
3.4 Volba tažné mezery a přídržovače	41
3.5 Rozměry technologického otvoru	42
3.6 Výpočet síly a práce	42
3.7 Volba stroje	46
3.8 Návrh nástroje	47
3.9 Simulace výroby	53
4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	59
5 ZÁVĚRY	63

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD [1], [2], [3]

Při výrobě součástí se v dnešní době využívá řada technologií. Mezi nejvíce používané patří obrábění, tváření, odlévání a svařování. Většinou se technologie kombinují pro dosažení optimální produktivity výroby, přijatelných nákladů a požadované kvality. Důležitá kritéria pro volbu způsobu výroby jsou rozměry součásti, velikost výrobní série či požadovaná přesnost.

Tváření je vysoce produktivní, progresivní a efektivní proces výroby, a proto i perspektivní technologií zpracování kovů a jejich slitin. Účelem je výroba hutních polotovarů, strojírenských polotovarů i hotových součástí. Tváření lze v základu podle druhu a způsobu zpracování polotovaru rozdělit na objemové a plošné, do kterého se řadí technologie stříhání, ohýbání a tažení.

Tažení je nejběžnější a v technické praxi nejpoužívanější technologie plošného tváření. Je nedocenitelná při zpracování plechů. Tažení plechu je technologický proces tváření, při kterém se z rovinného přístříhu plechu vytvářejí výtažky jednoduchých rotačních nebo hranatých tvarů, ale taky složité a nesymetrické součásti. V průmyslové praxi se takto vyrábí široký sortiment různých nádob, krytů, vík a částí karoserií. Příklady součástí vyrobených tažením můžeme vidět na obrázku 1.

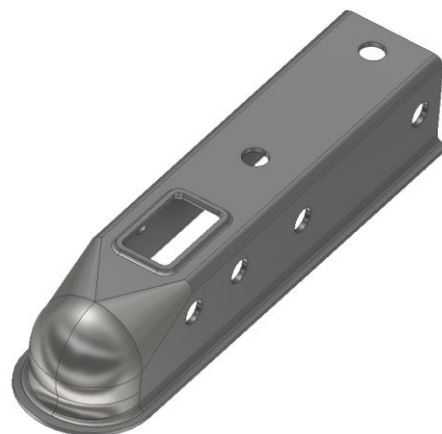


Obr. 1 Příklady součástí vyrobených tažením [4], [5], [6]

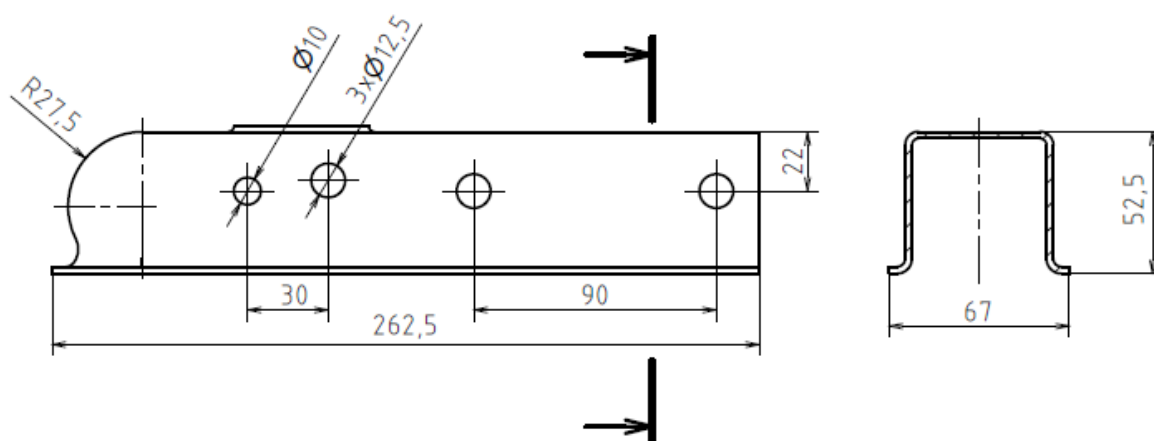
1 ROZBOR ZADÁNÍ [7], [8], [9]

Řešenou součástí je kryt tažného kloubu (obr. 2), který se používá ke spojení přívěsného vozíku (obr.4) a tažného zařízení automobilu.

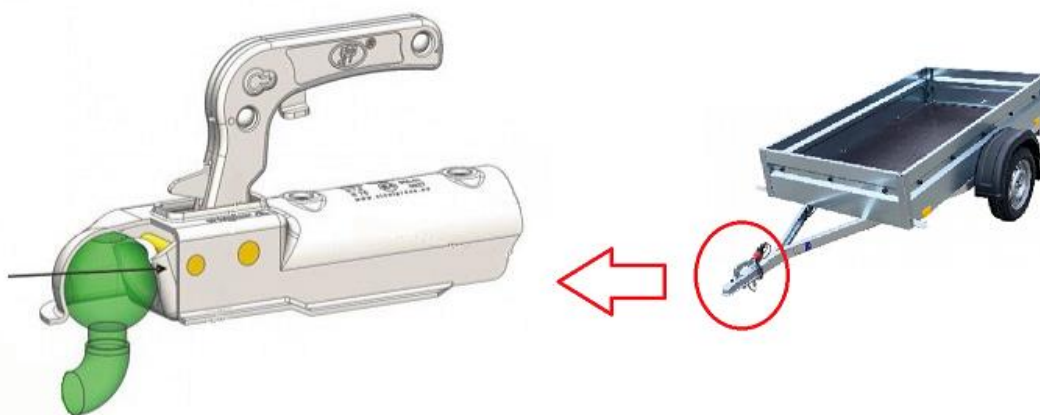
Součást má čtvercový profil zakončený kulovou plochou. Základní rozměry jsou znázorněny na obrázku 3. Tloušťka stěny čtvercového profilu je konstantních 2,5 mm. Součást je opatřena přírubou pro zvýšení pevnosti. Na horní straně je hranatá díra opatřena lemem. Skrz ni je prostrčena klika, kterou se ovládá segment (obr. 4) zajišťující aretaci tažného kloubu na závěsném zařízení. Dále jsou na horní straně dva otvory o průměru 12,5 mm a rozteči 90 mm pro šrouby zajišťující uchycení tažného kloubu na oje přívěsného vozíku. Na boční straně jsou dvě díry průměru 12,5 mm a 10 mm s roztečí 30 mm pro čepy na, které se uchycuje mechanismus kliky. Další dva otvory o průměru 12,5 mm a rozteči 90 mm jsou opět pro přichycení k oji. Nepoužívají se společně všechny čtyři otvory, ale pouze horní nebo boční, a to dle provedení oje.



Obr. 2 Kryt tažného kloubu



Obr. 3 Základní rozměry součásti



Obr. 4 Přívěsný vozík [7]

Při výběru materiálu je důležité vzít v úvahu fakt, že kryt bude při provozu namáhán tahem, ale také rázy, vzniklými nerovnostmi vozovky a následným poskakováním vozíku. Dále je nutné zvážit prostředí, ve kterém bude součást pracovat. V letním období bude přicházet do styku pouze s vodou, ale v zimě přijde do styku také s posypovou solí, která je velmi agresivní. Nabízejí se tedy dvě možnosti řešení, a to vyrobit součást z korozivzdorného materiálu nebo použít konstrukční ocel s následnou povrchovou úpravou. Vzhledem k vysokým cenám korozivzdorných materiálů bude použita konstrukční ocel a následně zinkování. Pro snadnou výrobu je nutná dobrá tváritelnost za studena a také vhodnost materiálu pro žárové zinkování. Těmto požadavkům vyhovuje uhlíková ocel 11 320. Jedná se o nelegovanou uhlíkovou ocel. Mechanické vlastnosti a chemické složení je uvedeno v tabulkách 1 a 2.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti oceli 11 320 [9]

Mez kluzu R_e [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%] min.	Tažnost A_{10} [%] min. napříč
max. 290	270-370	30	28

Tab.2 Chemické složení oceli 11 320 [9]

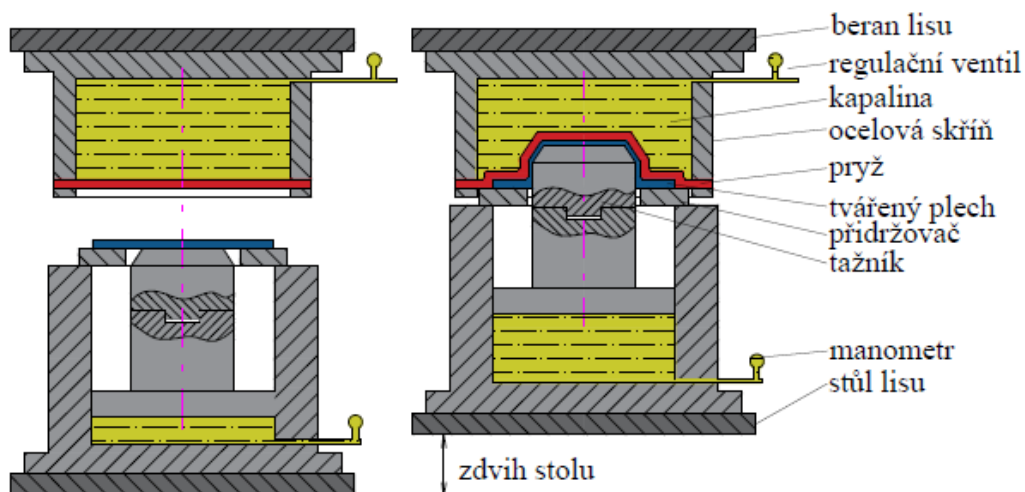
Prvek	C	P	Si
hm. %	max. 0,11	max. 0,045	max. 0,045

1.1 Variantní řešení [1], [10], [11], [20], [22], [23], [24]

Pro výrobu zadané součásti lze použít více technologií. Rozhodující pro její volbu je tvar dílce, jakost povrchu, mechanické vlastnosti a ekonomičnost. Dále hraje svou roli také velikost roční produkce, která je stanovena na 50 000 kusů ročně.

Vzhledem ke konečnému tvaru krytu připadají v úvahu pro jeho získání následující technologie:

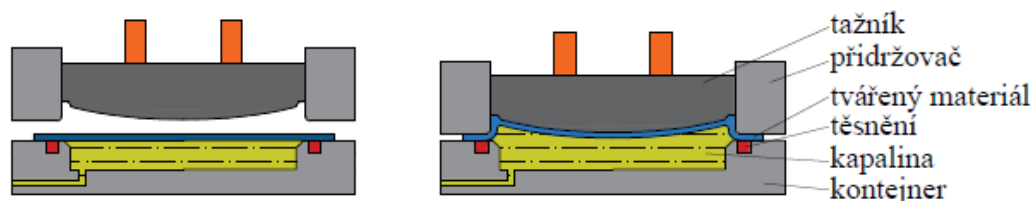
- hydroform (obr. 5) – je jednou z metod používajících nepevný nástroj. Tažnice je tvořená kapalinou, která je uzavřená tenkou gumovou membránou v nádobě. Nejdřív přidržovač přitlačí přístřih, aby nedošlo ke zvlnění okrajů a následně se tažník vtlačuje do nádrže a tím dochází k tváření materiálu. Zpočátku se vytváří zaoblený tvar kolem tažníku, zvyšováním tlaku se dále rovnoměrně přitlačuje elastickou membránou na nástroj a současně taky slouží jako přidržovač. Nadbytek kapaliny se vypouští ventilem a tím dochází i k regulaci hydrostatického tlaku.



Obr. 5 Hydroform [11]

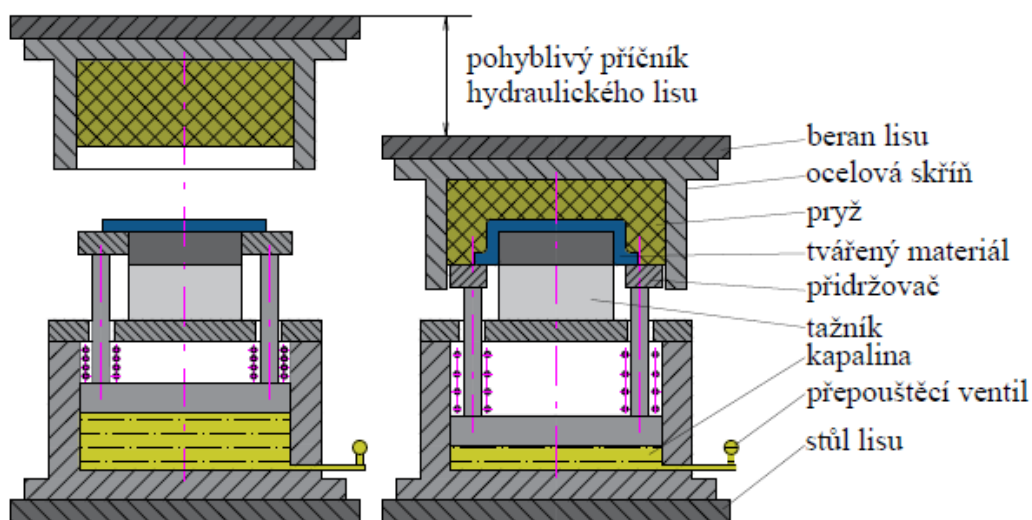
Ventil se nachází také ve spodní části nástroje pro regulaci síly tažníku. Nástroj je znázorněn na obrázku. Tato metoda je vhodná pro tažení hlubších a složitějších tvarů výtažků. Mezi výhody patří rovnoměrné působení tlaku po celé ploše tažníku, plynulá regulace tlaku a variabilita výroby. Naopak nevýhodou jsou vysoké požadavky na těsnost celého hydraulického systému, vysoká pořizovací cena zařízení, delší výrobní časy.

- hydromechanické tažení (obr. 6) – je technologie, při které na rozdíl od předcházející metody tlaková kapalina působí přímo na povrch polotovaru. Přístříh je sevřen přídržovačem a tažnicí. Tlak vytvořený přídržovačem zaručí těsnost mezi tažnicí a přístřihem. Následuje zvýšení tlaku v tažnici na pracovní hodnotu, přičemž dochází k částečné deformaci polotovaru. Dosednutím tažníku na plech a jeho následným vnikáním do objemu kapaliny dojde v tažné komoře k prudkému nárůstu tlaku a tím k tvarování plechu nabalováním na tažník. Regulaci tlaku a odvod přebytečné kapaliny zajišťuje regulační a řídicí ventil. Mezi výhody patří dosahování velké přesnosti, nepoškozený povrch plechu, možnost tahání tvarově složitých výtažků, absence pružné membrány. Nevýhodou je nárůst tažné síly v důsledku překonávání protitlaku kapaliny, nedají se vyrobit výtažky bez příruby, nutnost použití vysokotlakých hydraulických prvků.



Obr. 6 Hydromechanické tažení [11]

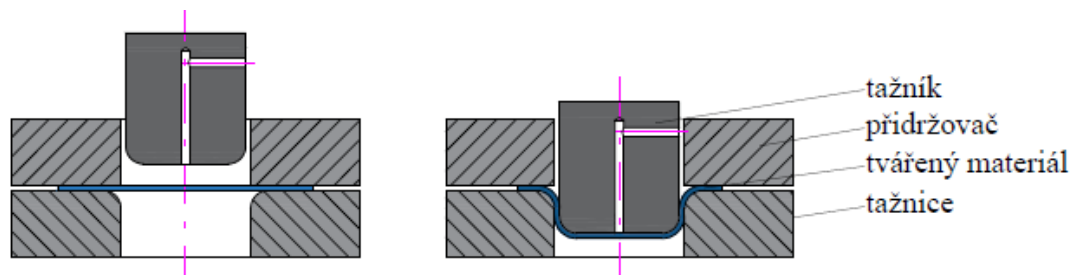
- marform (obr.7) – je metoda tváření pomocí pryže uložené v kontejneru. Plechový přístříh se umísťuje mezi pryž a hydraulický přídržovač. Přítlačná síla přídržovače je regulována přepouštěcím ventilem. Po dosednutí přídržovače dojde k aretaci polotovaru. Působením tažníku přes přístříh směrem do nepevného nástroje vzniká výsledný výtažek díky nabalování materiálu na tažník. Vrchní pohyblivý díl se nazývá tažnice, která je tvořena ocelovou skříň, v níž je uloženo pružné médium.



Obr. 7 Marform [11]

Využívá se jeden pryžový monoblok z měkkí pryže. Jeho výška musí být alespoň trojnásobek výšky vyráběné součásti, jinak by docházelo k rychlému opotřebení a ztrátě pružnosti pryže. Tlak v pružném médiu dosahuje hodnot $40 \div 50$ MPa. Po dokončení tažení se vrchní díl nástroje zvedne a výtažek je z tažníku setřen přídržovačem. Nevýhodou je omezená životnost elastického média a potřeba větší síly při tváření kvůli překonávání odporu elastomeru. Technologie marform je vhodnější pro menší výrobní série.

- hluboké tažení (obr. 8) – je technologie tváření, při které se z rovinného přístříhu zhotovuje v jedné nebo více operacích výtažek. Zatlačováním tažníku do přístříhu dochází k nabalování materiálu na nástroj, za současného vtahování přístříhu do tažnice. Existují dva způsoby tažení. Prvním z nich je tažení bez ztenčení stěny, při kterém je mezera mezi tažníkem a tažnicí větší než tloušťka přístříhu. Proto se tloušťka stěn i dna výtažku vůči přístříhu nemění. Dosahuje se menších stupňů přetvoření. Díky nízkému součiniteli tření nedochází k velikému zpevnění materiálu. Druhým způsobem je tažení se ztenčením stěny, u kterého je mezera mezi nástroji menší než tloušťka přístříhu. Výtažek tak má nezměněnou tloušťku dna a tloušťka stěn je tenčí. Dosahuje se vyšších stupňů přetvoření a tím i menšího počtu tažných operací než při tažení bez ztenčení stěny. Mezi výhody hlubokého tažení patří vysoká produktivita, hospodárné využití materiálu, přesnost výroby a minimální požadavky na dokončovací operace. Nevýhodou této technologie je vyšší pořizovací cena nástrojů, proto je vhodná pro větší série.



Obr. 8 Hluboké tažení [11]

Pro výrobu bočních otvorů se jako vhodné výrobní technologie jeví:

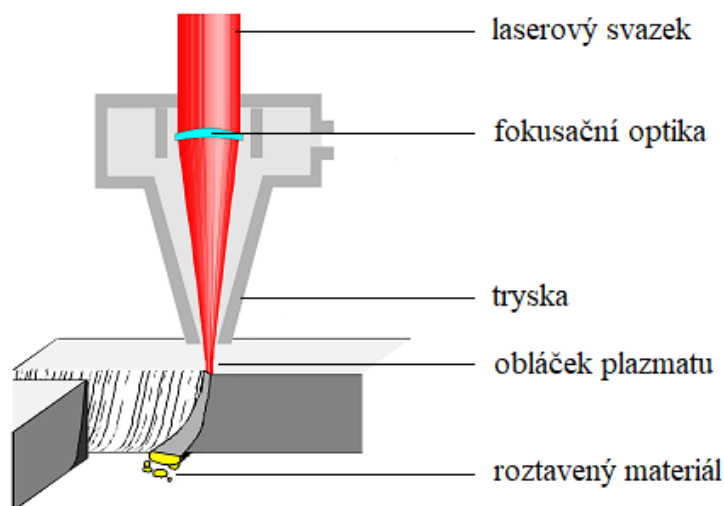
- vrtání (obr. 9) – spadá do oblasti třískového obrábění. Jedná se o výrobní metodu, kterou se zhotovují otvory do plného materiálu nebo je využívána k obrábění již vzniklých otvorů jinou technologií, např. kování, odléváním. Hlavní pohyb je rotační a provádí ho zpravidla nástroj. Osa vrtáku je obvykle kolmá k obráběné ploše, kde vrták vchází do obráběného materiálu. Vedlejší posuvový pohyb je vykonáván také nástrojem, a to ve směru své osy. Mezi nevýhody vrtání patří relativně delší výrobní časy.



Obr. 9 Vrtání [22]

- řezání laserem (obr. 10) – je založeno na principu vynucené emisi fotonů v aktivním prostředí. Rovnoběžný paprsek z laseru je zaostřen pomocí vhodné optiky do ohniska, kde vlivem vysoké koncentrace energie dochází k ohřevu, jež je

rychlejší než odvod tepla. Dochází tak ke vzniku key hole, ze které se roztavený kov vyfukuje proudem inertního plynu. Tato technologie patří v současné době k nejmodernějším způsobům dělení materiálu. Velkou výhodou je rozmanitost využití zařízení. Laser lze využít například ke svařování, povrchovému kalení a gravírování nebo již zmíněnému řezání. Naopak nevýhodou je vysoká pořizovací cena.



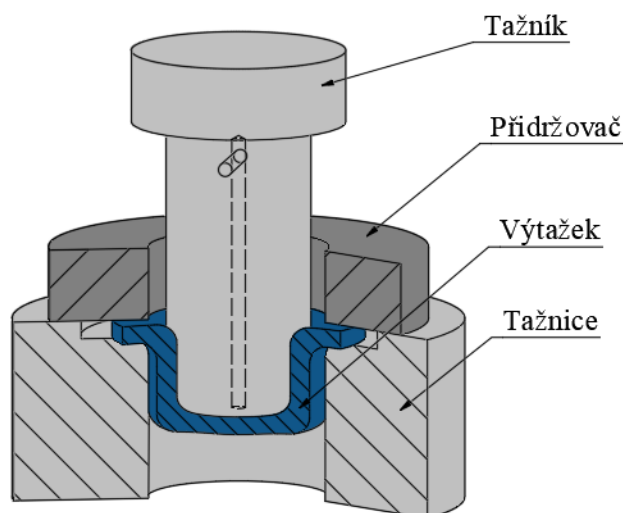
Obr. 10 Princip laseru [20]

Z výše zmíněných technologií při uvážení finanční náročnosti zařízení a velikosti vyráběné série se jako nejvýhodnější pro výrobu krytu tažného kloubu jeví hluboké tažení. Nejjednodušší způsob pro výrobu otvorů se zdá jejich zhotovení společně s výrobou přístřihu. To ovšem může při následném tažení vést ke zdeformování nebo ovalitě bočních otvorů pro čepy a šrouby. Proto se při získávání přístřihu zhotoví pouze otvory na horní straně, tedy hranatý otvor pro kliku a dva otvory pro šrouby. Zbylé otvory nacházející se na bočních stranách součásti se tedy vyrobí až po tažení. Pro výrobu těchto otvorů bylo z výše zmíněných technologií zvoleno řezání laserem, z důvodu rychlosti výroby.

Z těchto vybraných technologií k výrobě zadané součásti, je stěžejní technologie hlubokého tažení. Proto bude především na tuto oblast zaměřena v dalším literární studiu i praktická část práce.

2 TECHNOLOGIE TAŽENÍ [1], [2], [3], [10], [11], [12], [42]

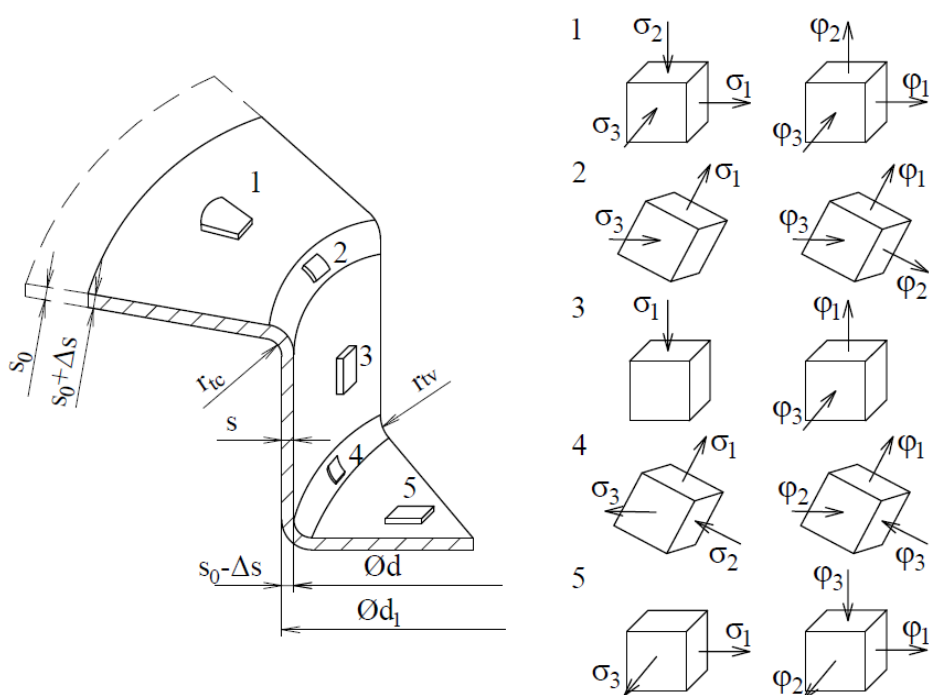
Tažení je metoda plošného tváření, při které se z rovinného plechového přístříhu zhotoví duté těleso požadovaného tvaru a rozměrů. Jde o velmi rozšířený způsob zpracování plechu, kterým lze poměrně snadno vyrobit součásti s velkou tuhostí při nízké hmotnosti. Jedná se o prostorový ohyb do nerovinného tvaru bez výrazného ztenčení stěny nebo naopak se zeslabením stěny. Tvarově jednoduché a mělké výtažky bývají zpravidla vyrobeny v jedné operaci, složité a hluboké se zhotovují ve dvou a více operacích. K přetvoření polotovaru dochází tlakem tažníku působícího na přístříh, který je vtahován do prostoru tažnice (obr. 11). Vyrábí se tak široký sortiment tvarově různých krytů, vík, částí karoserií a dalších součástí.



Obr. 11 Schéma konvenčního tažného nástroje [11]

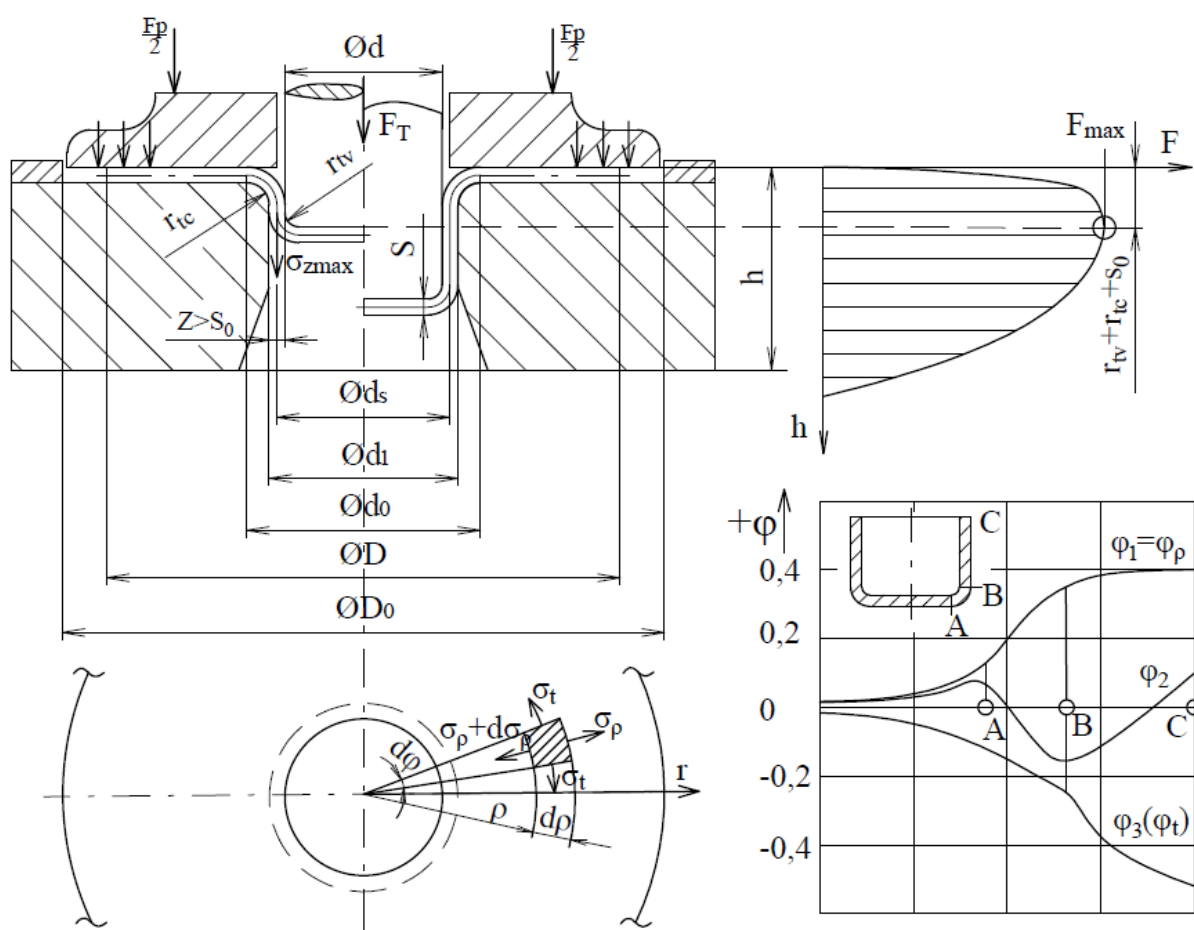
Při tažení bez zeslabení stěny je mezi tažníkem a tažnicí dostatečná vůle, aby jí prošly i zesílené okraje výtažku. Tloušťka stěny se totiž během tažení ve skutečnosti mění. V průběhu tváření dochází k intenzivnímu pěchování materiálu v oblasti příruby. Na konci příruby se tedy zvětšuje její tloušťka v závislosti na stupni tažení. Možnému zvlnění se zabráňuje přidržovačem. Naopak v místech prostorového ohybu u dna výtažku dochází k zeslabení stěny vlivem měnícího se koeficientu tření a kompenzace nedostatku materiálu.

Uvnitř materiálu, vlivem jeho tváření, vzniká tahová, tlaková nebo kombinovaná napjatost. Rozbor napjatosti je uveden pouze pro symetrický rotační výtažek. U ostatních tvarů výtažků je rozbor napjatosti a určení deformačního odporu σ_a obtížnější a k řešení se převážně využívá simulací. Schéma napjatostí pro válcový výtažek je znázorněno na obrázku 12.



Obr. 12 Schéma napjatosti a deformace [2]

V přírubě vzniká vlivem tlaku přidržovače prostorová napjatost. V ploše je tedy radiální tahové napětí σ_1 a tangenciální tlakové napětí σ_3 , ke kterým v kolmém směru působí osové tlakové napětí σ_2 . Při tažení bez přidržovače se ovšem schéma mění s ohledem na chybějící σ_2 . Na poloměru tažnice r_{tc} vzniká složitá deformace, způsobená prostorovým ohybem za souběžného působení největšího radiálního tahového napětí a malého tangenciálního tlakového napětí. Ve válcové části výtažku se vyskytuje pouze rovinná tahová napjatost σ_1 a taky prostorová deformace. V zaoblené části mezi válcovou částí a dnem je prostorová nestejnorodá napjatost, způsobující značné prodloužení společně se ztenčením stěny v tomto místě. Z toho důvodu se jedná o nejčastější místo, ve kterém nejčastěji dochází k utržení dna výtažku. Ve dně součásti vzniká tvářením rovinná jednoosá napjatost a prostorová deformace. Zeslabení dna výtažku je u jednooperačního tažení zanedbatelné. K intenzivnějšímu zeslabení dochází zejména při víceoperačním postupovém tažení.



Obr. 13 První operace tažení s přidržovačem a průběh logaritmických deformací po délce rozvinuté povrchy [2]

V praxi se tloušťka výtažků bere jako konstantní a zákon zachování objemu je zjednodušený na zákon rovnosti ploch. Velikost a průběh jednotlivých logaritmických deformací rozvinutých podél povrchové čáry výtažku, které jsou vyobrazeny na obrázku 13, váže zákon konstantního objemu:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (2.1)$$

kde: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – hlavní logaritmická přetvoření [-].

Hlavní logaritmická přetvoření lze určit dle následujících vztahů:

$$\varphi_1 = \ln \frac{D}{2\rho} = \ln \frac{R}{\rho}; \quad \varphi_2 = \ln \frac{s_0}{s} = 0; \quad \varphi_3 = -\ln \frac{D}{2\rho} = -\ln \frac{R}{\rho} \quad (2.2)$$

kde: D – průměr přístřihu při tažení [mm],

R – poloměr polotovaru [mm],

ρ – obecný poloměr výtažku [mm],

s_0 – tloušťka polotovaru [mm],

s – konečná tloušťka výtažku [mm].

Z podmínky rovnováhy sil v rovinném elementu dle obrázku 13 a podmínky plasticity je možné pozorovat průběhy radiálních a tečných napětí při tažení. Výsledkem je diferenciální rovnice, která má po zjednodušení následující tvar:

$$D - \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \frac{\sigma_\rho - \sigma_t}{\rho} = 0 \quad (2.3)$$

kde: σ_ρ – radiální napětí [MPa],

σ_t – tangenciální napětí [MPa].

Po zavedení okrajových podmínek na vnitřním poloměru příruby $\rho = D/2$, $\sigma_\rho = 0$ MPa a vyřešením rovnice je získán vztah pro ideální napětí ' σ_ρ ' bez vlivu přidržovače pro střední hodnotu přetvárného odporu:

$$\sigma_\rho = \xi \cdot \sigma_{ps} \cdot \ln \left(\frac{R}{\rho} \right) \quad (2.4)$$

kde: ξ – Lodeho součinitel (pro tažení $\xi = 1,1$),

σ_{ps} – střední hodnota přirozeného přetvárného odporu [MPa].

Tangenciální napětí se mění v závislosti na přesouvání okraje příruby směrem k ose výtažku. Jeho velikost lze spočítat dle následujícího vzorce:

$$\sigma_t = \xi \cdot \sigma_{ps} \cdot \ln \left(\frac{R}{\rho} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Třecí síly vzniklé použitím přidržovače brzdí pohyb příruby do tažnice. Pro výpočet se předpokládá rovnoměrné rozložení napětí od tření po celé tloušťce příruby. Toto napětí lze vyjádřit vztahem:

$$\sigma_f = \frac{f \cdot F_p}{\pi \cdot R \cdot s} \quad (2.6)$$

kde: σ_f – napětí vzniklé třením od přidržovače [MPa],

f – součinitel tření [-],

F_p – síla přidržovače [N].

Ohybové napětí je odvozeno z podmínky rovnováhy práce vnější síly a momentu při přemístění o úhel pootočení 'α':

$$\sigma_o = \frac{M_o}{s_o \cdot R_p} = \frac{\sigma_p \cdot s_o}{4 \cdot R_p} \quad (2.7)$$

kde: M_o – ohybový moment [N·m],
 R_p – střední poloměr $R_p = r_{tc} + s_o/2$ [mm],
 σ_p – přirozený přetvárný odpor [MPa].

Na velikost tažné síly má vliv radiální tahové napětí, měnící se v závislosti na poloměru 'ρ'. Dále na přirozeném přetvárném odporu materiálu, na velikosti napětí od tření mezi přidržovačem a na napětí, které vyjadřuje odpor ohybu na tažné hraně tažnice. Deformační odpor při tažení v 1. operaci je podle obrázku 13 vyjádřen:

$$\sigma_d = \sigma_z = \frac{F_t}{S} = (\sigma_p + \sigma_f + 2\sigma_o) \cdot e^{fa} \quad (2.8)$$

kde: σ_d – deformační odpor [MPa],
 σ_p – radiální tahové napětí [MPa],
 σ_f – napětí vzniklé třením s přidržovačem [MPa],
 σ_o – ohybové napětí na tažné hraně [MPa],
 e^{fa} – součinitel opásání tažné hrany [-].

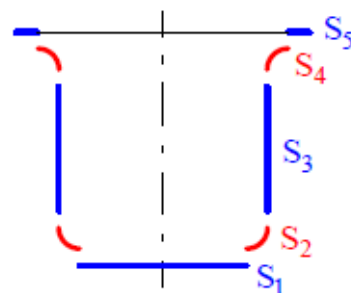
2.1 Určení velikosti polotovaru [1], [10], [12]

Během tvárné deformace se objem materiálu nemění, a právě proto je při volbě rozměrů polotovarů zásadní rovnost objemů polotovaru a hotového dílce. U tažení bez ztenčení stěny se drobné změny tloušťky zanedbávají a uvažuje se konstantní tloušťka. Potom se při návrhu vychází z rovnosti plochy polotovaru a výtažku. Přístříhy se zhotovují z válcovaných plechů, které však vykazují pro tažení anizotropní vlastnosti a na krajích výtažků vzniká cípatost. Proto se k vypočítanému průměru přístříhu připočítává přídavek na ostřížení. Metody pro stanovení jsou následující:

- metoda rovnosti ploch – je používána u méně složitých výtažků, kde je snadno aplikovatelná a zjištění výchozího polotovaru je rychlé. Protože se jedná o tažení bez ztenčení stěny, lze rozměry určit z rovnosti ploch. Přístříh má kruhový tvar, jehož průměr se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_v} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \sum S_i} \quad (2.9)$$

kde: D – průměr polotovaru [mm],
 S_v – povrch výtažku [mm²],
 S_i – části plochy výtažku [mm²].



Obr. 14 Rozložení ploch [12]

- guldinovo pravidlo – se využívá u součástí, kde je výpočet plochy složitější. Povrch rotačního tělesa, jež je tvořen otáčením křivky libovolného tvaru kolem osy, která je součástí stejné roviny jako křivka, se rovná součinu délky tvořící křivky a dráhy jejího těžiště. Pro povrch tělesa tedy platí vztah:

$$S_v = 2 \cdot \pi \cdot R_s \cdot L \quad (2.10)$$

kde: R_s – vzdálenost těžiště tvořící křivky od osy [mm],
 L – délka tvořící křivky [mm].

Průměr polotovaru se pak určí dle vzorce:

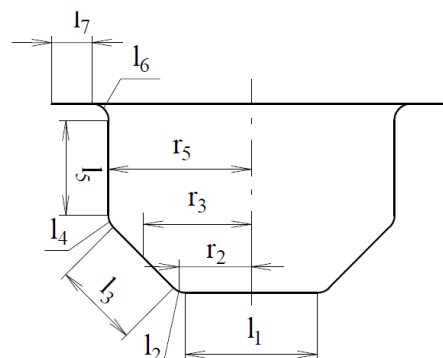
$$D = \sqrt{8 \cdot L \cdot R_s} \quad (2.11)$$

kde: $L \cdot R_s = \sum l_i \cdot r_i$,

l_i – dílčí délky [mm],

r_i – vzdálenost těžiště [mm].

Křivka z osového řezu se vhodně rozdělí na jednotlivé elementy a následně se určí jejich délky i těžiště. Poté se z takto určených hodnot a podle vzorce (2.11) vypočte výsledný průměr polotovaru.



Obr. 15 Příklad výpočtu [10]

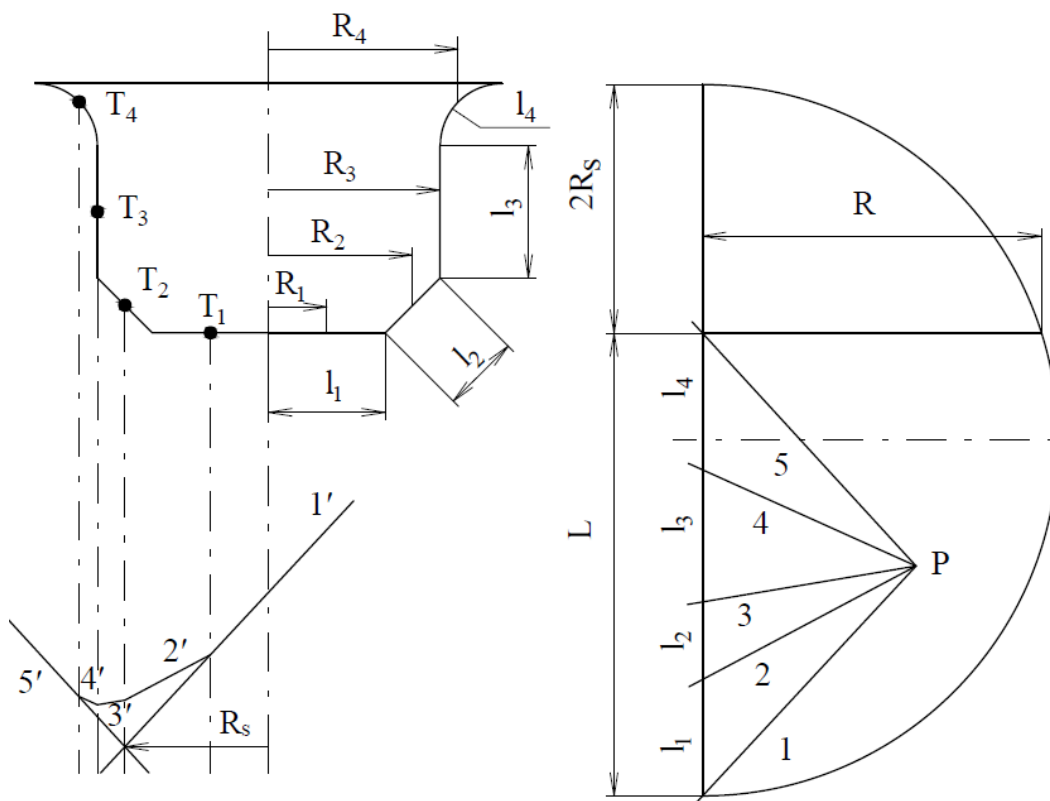
- graficko-analytická metoda – je opět určena pro dílce složitého tvaru. Obrysová čára se rozdělí na úsečky a části kružnic, které se dále dělí malé elementy, tvarem blízcí se přímkám. Dále se pro každý úsek vyznačí těžiště a taky délky jednotlivých úseků. Následně se vynásobí délka úseku s příslušným poloměrem těžiště a všechny součiny se sečtou:

$$\sum l_i \cdot r_i = l_1 \cdot r_1 + l_2 \cdot r_2 + \dots + l_i \cdot r_i \quad (2.12)$$

Z této sumy se následně určí průměr přístřihu z tabulek nebo jej lze spočítat jako:

$$D = \sqrt{8 \cdot \sum l_i \cdot r_i} \quad (2.13)$$

Grafický postup je znázorněn na obrázku 16. Z vyznačených těžišť se vynesou svislé čáry. Délky jednotlivých úseků se vynesou na společnou přímku. Zvolí se libovolný pól 'P' a vykreslí se jednotlivé paprsky z pólu, které jsou přeneseny do již připravených svislic. Určí se ' R_s ' a poté vynese jeho dvojnásobek nad ' L ' a vykreslí se kružnice. Tím je určen průměr výchozího polotovaru, který je roven ' $L + 2R_s$ '.



Obr. 16 Grafický způsob určení polotovaru [12]

- software – umožňuje určit rozměr polotovaru velmi přesně pomocí numerických simulací. Z modelu součásti je zjištěn její konečný objem (plocha), ze kterého je spočítán rozměr a tvar polotovaru. Po takovém určení přístříhu nemusí být potřebné ani konečné ostřížení součásti.

2.2 Součinitel tažení a počet tažných operací [2], [3], [10], [12], [13]

Tažení lze provádět na jednu nebo více operací (obr. 17), přičemž pro trvalou deformaci je nutné překročit mez kluzu. Naopak nesmí dojít k překročení meze pevnosti, kdy dochází k porušení soudržnosti materiálu a nejčastěji pak k utržení dna výtažku. Je tedy vhodné, aby se tažení skládalo z co nejmenšího počtu tahů s velkým stupněm deformace. Při tváření za studena dochází ke zpevňování materiálu což má za následek posouvání meze kluzu k mezi pevnosti, která ovšem roste jen nepatrně. Tím dochází ke zmenšování zásoby tvařitelnosti materiálu a po jejím vyčerpání je nutné provádět mezioperační rekrytalizační žihání pro odstranění vzniklého zpevnění a obnovení tvařitelnosti materiálu.

Stupeň deformace při tažení válcových výtažků lze určit dle následujících ukazatelů:

$$\varepsilon_i = \frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}} = 1 - m_i \quad (2.14)$$

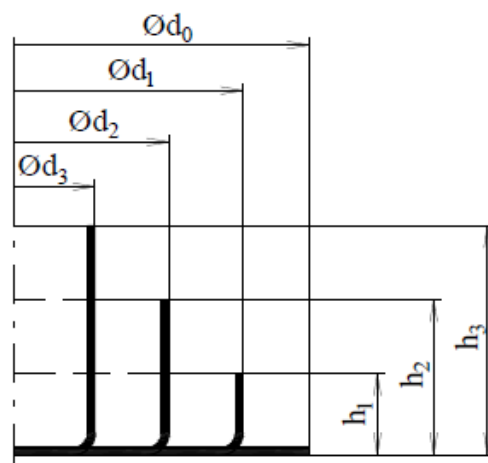
kde: ε_i – poměrné přetvoření pro i-tou operaci [-],
 d_i – průměr výtažku v i-té operaci [mm],
 m_i – součinitel tažení v i-té operaci [-].

$$m_i = \frac{d_i}{d_{i-1}} \quad (2.15)$$

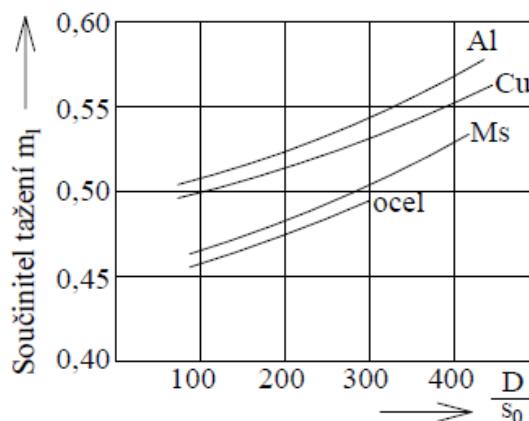
$$K_i = \frac{1}{m_i} = \frac{d_{i-1}}{d_i} \quad (2.16)$$

kde: K_i – stupeň tažení v i-té operaci [-].

Tyto ukazatele jsou na sobě závislé a správný stupeň deformace určují jen při úplném vtažení příruby do povrchu součásti. Dovolенý mezní stupeň tažení stejně jako součinitel tažení závisí kromě materiálu na druhu materiálu, předchozím zpevnění, poměrné tloušťce polotovaru, poloměru zaoblení tažnice a tažníku, způsobu mazání a rychlosti tažení. Na obrázku 18 jsou znázorněny křivky experimentálně zjištěných mezních hodnot součinitelů tažení pro první tah pro různé materiály. Z diagramu je patrné, že součinitel tažení je závislejší na poměru $D \cdot S^{-1}$ než na mechanických vlastnostech materiálu.



Obr. 17 Postup víceoperačního tažení [2]



Obr. 18 Mezní hodnoty součinitele tažení [12]

Optimální hodnoty součinitelů tažení jsou uváděny v tabulkách, ze kterých se určují v závislosti na poměrné tloušťce polotovaru. Pro určení poměrné tloušťky slouží následující vzorec:

$$P = \frac{s_0}{D} \cdot 100 \quad (2.17)$$

kde: P – poměrná tloušťka [%],
 s_0 – tloušťka polotovaru [mm],
D – průměr polotovaru [mm].

Víceoperační tažení se provádí podle schématu zobrazeném na obrázku 17. Pro stanovení nejmenšího počtu tažných operací se zvolí součinitelé tažení m' , které představují nejmenší možný poměr průměru výtažku k původnímu průměru přístříhu nebo předešlého výtažku. Z toho plyne, že po daném počtu operací dostáváme z přístříhu o průměru d_0 výtažek o průměru d_n a výšce h_n . Pro výpočet potřebného počtu tahů se používá následující vztah:

$$n = 1 + \frac{\ln(d_n) - \ln(m_1 \cdot d_0)}{\ln(m')} \quad (2.18)$$

kde: n – počet tahů [-],
 d_n – průměr hotového výtažku [mm],
 m_1, m' – součinitelé tažení [-].

2.3 Poloměry zaoblení tažných hran a tažená mezera [1], [3], [12], [13], [15]

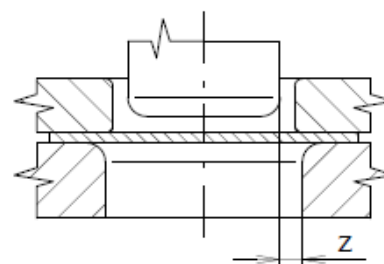
Geometrie hlavních funkčních částí tažného nástroje mají zásadní vliv na tažný proces. Jedná se především o poloměr zaoblení tažnice, tažníku a správně zvolenou tažnou vůli.

Poloměr zaoblení tažnice r_{tc} má na průběh tažení hlavní vliv. Je na něm závislé napětí v taženém materiálu, tažná síla, ale taky vznik vln a eventuálně přetržení dílce. Právě v tomto místě dosahuje radiální napětí svého maxima. Zvětšováním poloměru se usnadňuje tažení a je možno zvětšovat hloubku i stupeň tažení. Současně dochází však ke zmenšování plochy pod přidržovačem a zvětšuje se možnost vzniku vln a přeložek. Při malém poloměru se zvětšuje tažná síla, namáhání nástroje a taženého materiálu. Je dosaženo rovnějších okrajů výtažku, ale může se zvětšit cípatost okrajů. Poloměr tažné hrany pro první tah se vypočítá dle vzorce:

$$r_{tc} = 0,8 \cdot \sqrt{(D - d_1) \cdot s_0} \quad (2.19)$$

kde: r_{tc} – poloměr zaoblení tažné hrany [mm].

Poloměr zaoblení tažníku r_{tv} je v praxi rovno velikosti zaoblení tažnice. Z toho důvodu platí totožná rovnice pro určení poloměru zaoblení. Pro druhé až předposlední tahy se tažné hrany upravují zkosením o úhel $30^\circ \div 45^\circ$. Poloměr zaoblení u posledního tahu se volí s ohledem na velikost výtažku a má se rovnat minimálně trojnásobku tloušťky přístříhu.



Obr. 19 Tažná mezera [2]

Tab. 3 Zaoblení tažné hrany tažníku [3]

$\varnothing d$ výtažku [mm]	10 ÷ 100	100 ÷ 200	200 a výše
r_{tv} [mm]	$(3 \div 4) \cdot s_0$	$(4 \div 5) \cdot s_0$	$(5 \div 7) \cdot s_0$

V případě potřeby menšího zaoblení hrany dna je třeba výtažek kalibrovat na příslušný poloměr.

Velice důležitá je volba optimální tažné mezery, jež je definovaná jako mezera mezi tažníkem a tažnicí. Na obrázku 19 je znázorněna tažná mezera 'z', která představuje polovinu hodnoty tažné vůle. Velikost tažné mezery by měla být při tažení bez ztenčení stěny větší než tloušťka stěny s ohledem na snížení tažné síly. Je nutné taky počítat se zesílením okraje přístřihu při tváření a s nestejnou tloušťkou materiálu. Optimální velikostí se snižuje tažnou sílu, opotřebení nástroje. V případě nedostatečně velké mezery dochází k nárůstu tažné síly, zadírání plechu v nástroji a může dojít k utržení dna. Naopak příliš velká mezera může znamenat zvlnění a horší jakost dílce. Podle normy ČSN 22 7301 se volí:

$$z_1 = (1,2 \div 1,3) \cdot s_0 \quad (2.20)$$

kde: z_1 – tažná mezera pro první tah [mm].

Při druhém a následujících tazích se mezera postupně zmenšuje. Pro poslední tah se mezera volí:

$$z_n = (1,1 \div 1,2) \cdot s_0 \quad (2.21)$$

kde: z_n – tažná mezera pro poslední tah [mm].

V případě, že je nutno provést kalibraci výtažku, volí se tažná mezera následovně:

$$z_k = (1,0 \div 1,1) \cdot s_0 \quad (2.22)$$

kde: z_k – tažná mezera při kalibraci [mm].

2.4 Volba přidržovače [2], [10], [11], [13]

Tažení je proces, při kterém dochází ke značnému přesunu materiálu. Během tváření postupuje materiál z příruby směrem do válcové části a mává tendenci se vlnit. Dochází k tomu hlavně při vysokém stupni deformace. Pokud by došlo ke zvlnění a vlny by se přeložily a vytvořily přeložky, materiál by již neprošel tažnou mezerou. To by následně vedlo k zadření nástroje nebo utržení dna výtažku. Nebezpečí vzniku vln je tím větší, čím je plech tenčí a součinitel odstupňování tahu nižší. Tomu je zabráněno použitím přidržovače, který brání vzniku vln a zvrásnění. Svou funkční plochou přitlačuje plech k horní části tažnice, a tak brání vzniku vln. Potřeba přidržovače se určuje dle následujících vzorců:

$$u = 50 \left(q - \frac{\sqrt{s_0}}{\sqrt[3]{D}} \right) \quad (2.23)$$

kde: q – materiálová konstanta dle tab.4.

Tab. 4 Materiálové konstanty [13]

Materiál	Konstanta 'q'
Ocelový hlubokotažný plech	1,90
Mosazný plech	1,95
Hliníkový plech	2,00
Zinkový plech	2,00

Pokud součinitel 'u' splňuje podmínku:

$$u \geq \frac{100 \cdot d_1}{D} \quad (2.24)$$

Jedná se o tažení s přidržovačem. V případě že podmínka (2.24) splněna není, tak není zapotřebí použít přidržovač.

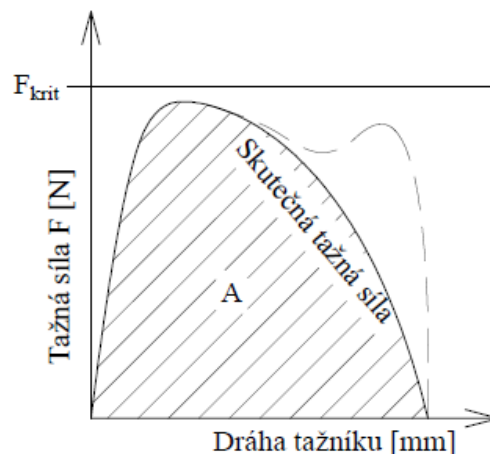
Šofman doporučuje tažení bez přidržovače, je-li splněna podmínka:

$$D - d_1 \leq 18 \cdot s_0 \quad (2.25)$$

Při tažení tlustostěnných výtažků zpravidla není přídržovač potřeba. Stabilita příruby je proti zborcení tangenciálním pěchováním dostatečná.

2.5 Síla a práce [1], [3], [10], [12]

Pro výpočet síly lze využít metodu využívající teoretické vzorce, založené na rozboru napjatostí a deformace součásti. Jedná se však o relativně složitý způsob určení, a proto se v praxi příliš často nepoužívá. Dále je možno využít praktické vzorce založené na přibližných empirických vztazích vycházejících z meze pevnosti výtažku. Průběh tažné síly je znázorněn na obrázku 20. Síla se mění od nuly po maximum, které je přibližně v polovině tahu a následně klesá. V praxi ovšem může průběh vypadat odlišně, na obrázku 20 znázorněn čárkovanou čarou. Důvodem vzniku druhého maxima je důsledkem špatně zvolené tažné vůle, která je menší než optimální. Zesilující se okraj výtažku je tlustší než tažná vůle a dochází tak k protahování.



Obr. 20 Průběh tažné síly [3]

Obecný vztah pro určení celkové tažné síly:

$$F_c = F_t + F_p + F_v \quad (2.26)$$

kde: F_c – celková tažná síla [N],

F_t – tažná síla [N],

F_p – přídržovací síla [N],

F_v – síla od vyhazovače [N].

Praktický výpočet vychází z předpokladu, že tažná síla musí být o něco menší než síla potřebná k utržení dna výtažku a je úměrná stupni tažení. Tažnou sílu tedy lze vypočítat podle vztahu:

$$F_t = \pi \cdot d_i \cdot s_0 \cdot R_m \cdot c \quad (2.27)$$

kde: R_m – mez pevnosti materiálu výtažku [MPa],

c – součinitel vyjadřující vliv součinitele tažení 'm', volí se dle tab. 5.

Tab. 5 Vybrané hodnoty součinitele 'c' [10]

Stupeň tažení 'K'	1,82	1,67	1,54	1,43	1,33	1,25
Součinitel tažení 'm'	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
Součinitel 'c'	1,00	0,86	0,66	0,55	0,50	0,40

V případě potřeby použití přídržovače bude jeho tlak záviset na druhu tvářeného materiálu a jeho tloušťce. Síla přídržovače se počítá dle následujícího vztahu:

$$F_p = p_p \cdot S_p \quad (2.28)$$

kde: p_p – tlak přídržovače [MPa],

S_p – plocha přídržovače [mm²].

Tlak přídržovače v prvním tahu lze vypočítat podle vztahu dle Siebla:

$$p_p = 0,0025 \cdot \left((K_1 - 1)^2 + \frac{0,5 \cdot d_1}{100 \cdot s_0} \right) \cdot R_m \quad (2.29)$$

kde: K_1 – stupeň tažení v prvním tahu [-],

d_1 – průměr výtažku po prvním tahu [mm].

Dalším způsobem volby tlaku přidržovače je volba dle tabulky 6, která byla sestavena podle výsledků pokusných měření. Hodnoty jsou přibližné, protože neberou zřetel na stupeň tažení a rozměry polotovarů.

Tab. 6 Hodnoty tlaku přidržovače 'p_p' [12]

Materiál	Ocel měkká s ₀ < 0,5mm	Ocel měkká s ₀ > 0,5 mm	Mosaz	Měď	Hliník
Měrný tlak [MPa]	2,5 ÷ 3,0	2,0 ÷ 3,5	1,5 ÷ 2,0	1,0 ÷ 1,5	0,8 ÷ 1,2

V praxi se nastavuje tlak přidržovače tak aby se netvořily vrásky následkem zvlnění přístřihu nebo trhliny. Při tažení na dvojčinných lisech je nejdůležitější nastavení nejmenší potřebné mezery pro danou tloušťku plechu, aby se přístřih pod přidržovačem nezadrhával a zároveň nevznikaly přeložky.

Vyhazovač působí při tváření proti pohybu tažníku, který překonává jeho odpor při tváření. Proto se musí jeho odpor zahrnout do celkové síly. Ta se vypočítá jako součin tuhosti pružiny a velikost stlačení:

$$F_v = R_{pr} \cdot \Delta_{lp} \quad (2.30)$$

kde: R_{pr} – tuhost pružiny vyhazovače [N · mm⁻¹],

Δ_{lp} – stlačení pružiny [mm].

Výsledná tažná síla 'F_c' musí splňovat v každém okamžiku tažení následující podmínku:

$$F_c < F_{krit} \quad (2.31)$$

kde: F_{krit} – kritická síla při utržení dna výtažku [N].

$$F_{krit} = \pi \cdot d_i \cdot s_0 \cdot R_m \quad (2.32)$$

Při nesplnění této podmínky dochází k utržení dna výtažku a tím k jeho nevratnému znehodnocení.

Pro volbu stroje je důležité znát nejen celkovou tvářecí sílu, ale také její práci, která je určena jako plocha pod křivkou průběhu síly v závislosti na hloubce tažení. Pro její výpočet se využívá následující vztah:

$$A = \frac{F_c \cdot h \cdot \psi}{1000} \quad (2.33)$$

kde: A – tažná práce [J],

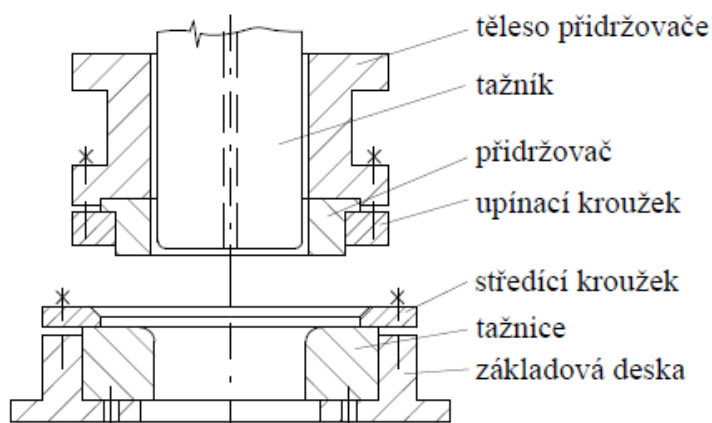
h – pracovní zdvih [mm],

ψ – koeficient plnosti diagramu, volí se 0,6÷0,8 [-].

2.6 Nástroje [2], [12], [13], [18], [25]

V tažných nástrojích dochází k přetvoření rovinných přístřihů v otevřená dutá tělesa. Při konstrukci nástrojů je důležité rozlišovat tažidla pro první a další tahy.

Jednoduchý tažný nástroj pro první operaci je vyobrazený na obrázku 21. Nástroj je určen pro použití na dvojčinném lisu. Skládá se z horního a spodního dílu. Spodní díl je tvořen základovou deskou, která slouží k upnutí spodního dílu nástroje na stůl lisu.

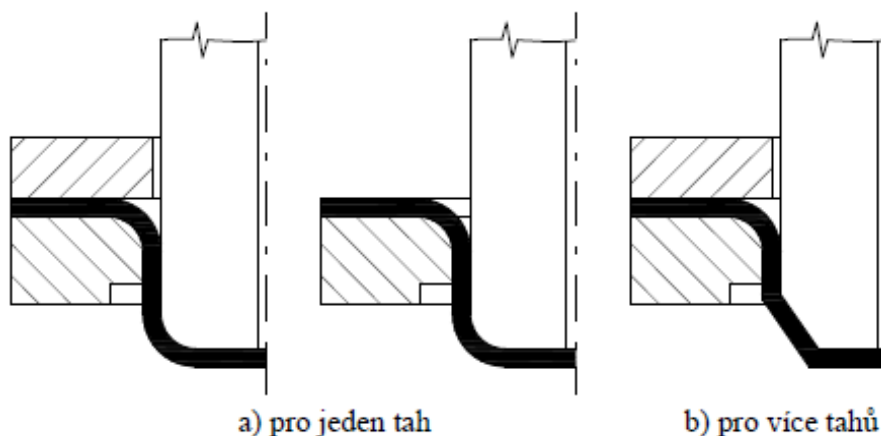


Obr. 21 Tažný nástroj [26]

Deska musí být rozměrově větší než tažnice, protože se upíná pomocí upínek. Do základové desky je nalisovaná tažnice. Přesné založení a vystředění přístřihu zajišťuje středící kroužek. Ten je šrouby připevněn k základní desce. Vrchní díl nástroje je složen z tažníku, který společně s tažnicí zajišťuje vlastní přetvoření přístřihu. Tažník je upnut do beranu lisu přímo za stopku. Dále je vrchní díl složen přídržovačem, který je připevněn upínacím kroužkem k tělesu přídržovače. Při tvářecím procesu se nejdříve založí přístřih a následně dojde k jeho přichycení přídržovačem. Následně dojde ke kontaktu tažníku a přístřihu.

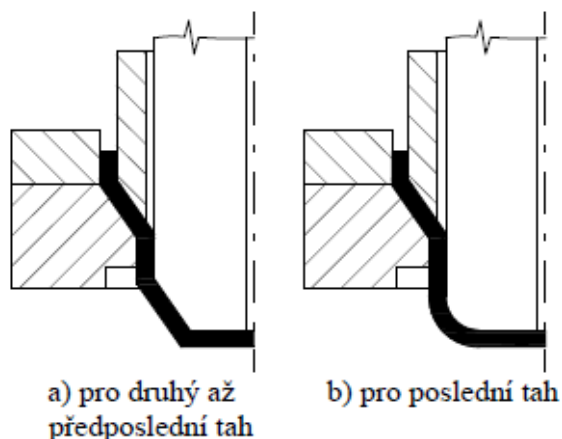
Tažné nástroje lze podle konstrukce rozdělit do tří skupin podle pořadí tahu, pro který je nástroj určen:

- tažidla pro první tahy – používají tažník s rádiusovým zakončením v dokončovací operaci (obr. 22a). Pokud se nejedná o poslední operaci tak může být tažník zkosený (obr. 22b), který snižuje napětí při tažení a taky zajišťuje lepší osazení v dalším tahu. Přídržovač se obvykle pro první tahy používá rovinného tvaru.



Obr. 22 Tažidla pro první tahy [25]

- tažidla pro druhé až předposlední tahy (obr. 23a) – mívají tažníky se zkosenou obvodovou hranou pod úhlem $35^\circ \div 45^\circ$. Kvůli rostoucí výšce výtažku je nutné použít také vyšší základovou desku. Delší musí být také přídržovač, který má zkosené hrany. U těchto nástrojů je možné používat jednočinné lisy, u nichž výtažky propadávají dolů.
- tažidla pro poslední tahy – jsou konstruována stejně jako předchozí tažidla pro druhé a další tahy. Liší se jen tvarem tažníku, který se pro poslední tah používá zaoblený, jak je znázorněno na obrázku 23b.

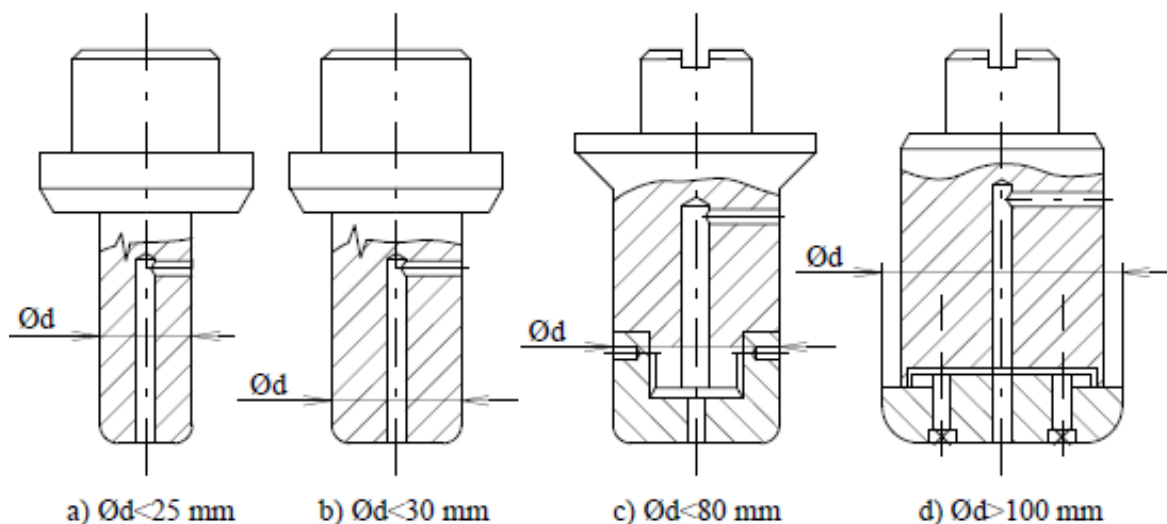


Obr. 23 Konstrukce tažníků pro více tahů [25]

Tažidla navržena teoretickými výpočty se ve většině případů musí při zkušebních tazích ještě dopracovat. Může docházet k trhání plechu, které se odstraňuje přidáváním žeber nebo změnou velikosti přístřihu. Zhotovování nástrojů pro nerotační výtažky je většinou doprovázeno velkými problémy, které lze nezdědkou odstranit jen zkusmo. Tyto problémy jsou následkem používání zjednodušených modelů při výpočtu, které nezahrnují všechny faktory ovlivňující tažení.

2.6.1 Tažníky [2], [13], [18], [25]

Tažníky jsou funkčním elementem, jejich funkční částí je čelo, poloměr zaoblení nebo zkosení a válcová část. Jejich vnější průměr je roven vnitřnímu průměru výtažku. Tažníky jsou namáhány na vzpěr a po obvodu jsou zatíženy radiálními silami. Všechny tažníky musí



Obr. 24 Konstrukce tažníků [2]

být opatřeny odvodušňovacím otvorem pro snadnější setření výtažku z tažníku. Jejich upnutí je řešeno normalizovanou stopkou, jež se upíná přímo do beranu lisu nebo do upínací desky nástroje. Vyrábějí se v různých konstrukčních provedeních, které jsou zobrazeny na obrázku 24.

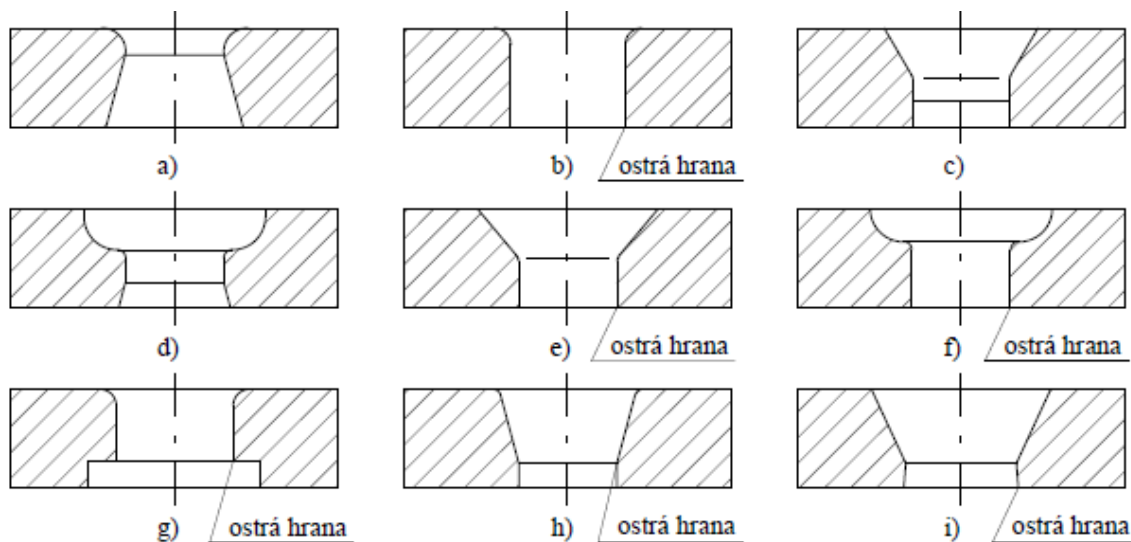
Pro malé průměry výtažků se používají tažníky vyrobené z jednoho kusu nástrojové oceli. Pro větší výtažky se používají tažníky dělené. Funkční část – vložka, je vyrobena z nástrojové oceli a držák z levnější konstrukční oceli. Vložka může být k držáku připevněna více způsoby, např. lepením, pájením nebo šrouby. U dělených tažníku je výhodou nižší spotřeba drahé nástrojové oceli, naopak nevýhodou je složitější konstrukce. O použití rozhoduje ekonomika strojírenské výroby.

2.6.2 Tažnice [1], [13], [18], [25]

Tvoří hlavní část nástroje a svou geometrií ovlivňuje celý tažný proces. Tažnice se vyrábějí celistvé, používané pro rotační a jednoduché nerotační výtažky, nebo vložkované kde se vložkuje pouze tažná hrana. Rozměrné tažnice jsou vyráběny jako dělené z důvodu lepší manipulace, uskladnění a záměny poškozené části za novou. Tažnice se k základové desce uchycují různými způsoby např. nalisováním, pájením, upínacím kroužkem, upínkou nebo šrouby. Varianty konstrukce tažnic jsou následující:

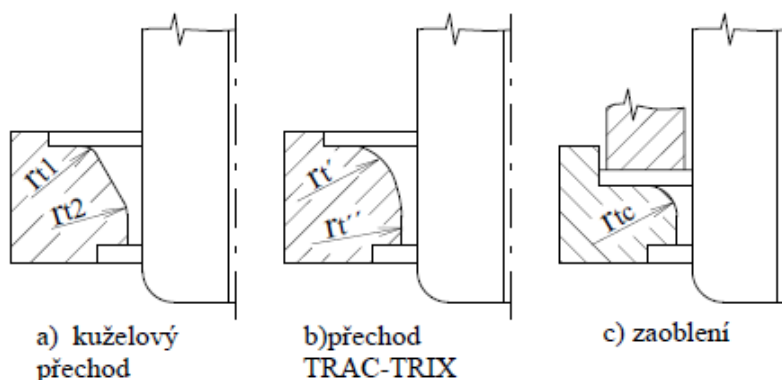
- výtažek se vrací nad povrch tažnice a následně je setřen z tažníku stíračem (obr. 25a),
- výtažek propadá vnitřním otvorem tažnice a je setřen ostrou stírací hranou nebo zvláštním stíračem (obr. 25b),
- tažnice pro druhý nebo další tah, kdy se výtažek vrací nad tažnici (obr. 25c),
- tažnice určená pro druhý nebo další tah do průměru 60 mm, kdy se výtažek vrací nad tažnici (obr. 25d),
- tažnice pro další tahy kdy výtažek propadá otvorem v tažnici (obr. 25e),
- tažnice určená pro druhý nebo další tah do průměru 60 mm, kdy výtažek propadá vnitřním otvorem tažnice (obr. 25f),

- tažnice, u níž je otvor ve spodní části odlehčený (obr. 25g),
- tažnice s kuželovým otvorem vhodná pro tažidla s přídržovačem, kde výtažek propadá vnitřním otvorem (obr. 25h),
- tažnice vhodná pro tlustší plechy (obr. 25i).



Obr. 25 Konstrukce tažnic [13]

Funkční otvory tažnic mají rozdílné tvary v závislosti na geometrii výtažku a jeho vyjímání z nástroje. Snahou je dosáhnout snadného vnikání materiálu do otvoru s co nejmenším odporem. Na obrázku 26 jsou znázorněny používané úpravy hran. Varianta 'a' - kombinace poloměrů a kužele, se používá v případě dostatečné tloušťky materiálu a nízkého stupně tažení bez přídržovače. V případě použití profilu TRAC-TRIX, varianta 'b', se dosahuje nízkých součinitelů tažení a lze táhnout menšími tažnými silami.



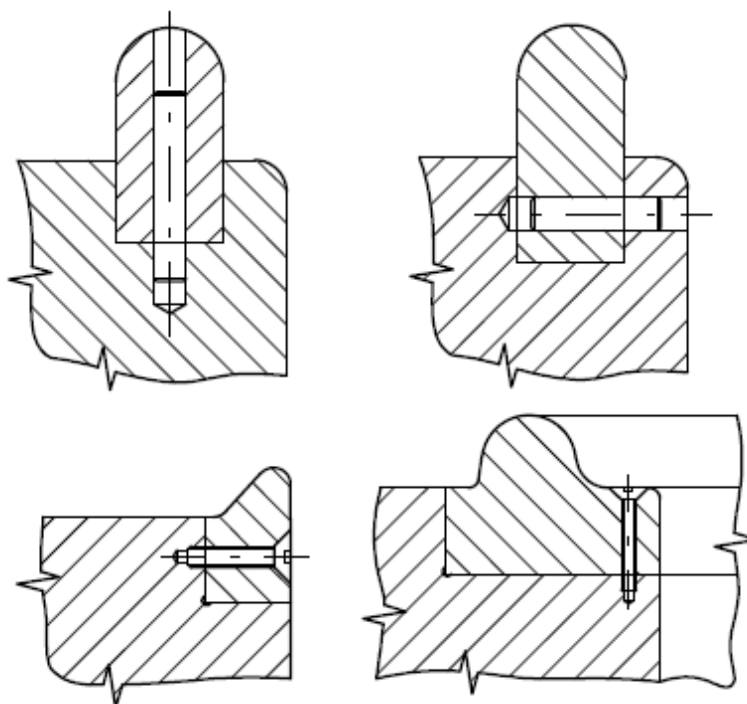
Obr. 26 Konstrukce tažných hran [2]

2.6.3 Brzdná žebra [18], [25]

Hlavním důvodem použití žebra je zabránění vzniku vln u velkých a nepravidelných součástích. Jde tedy o zpomalování nebo naopak zrychlování toku materiálu do tažnice v požadovaných místech. Dochází k nárůstu brzděné intenzity, která je tvořena ohybem plechu přes žebro tam a zpět. Při ohybu dochází ke ztenčení tloušťky materiálu. Díky zvětšenému tangenciálnímu napětí není nutné používat velké technologické přídavky. Důsledkem je taky dosažení malých pružných deformací a lepší jakosti povrchu. Pro správnou funkci je důležité zvolit správný typ brzdného žebra:

- vtahovací – zabraňují zvlnění u kruhových výtažků. Poloměr zaoblení výstupku se volí v závislosti na tloušťce přístřihu, $r = (3 \div 10) \cdot s_0$.

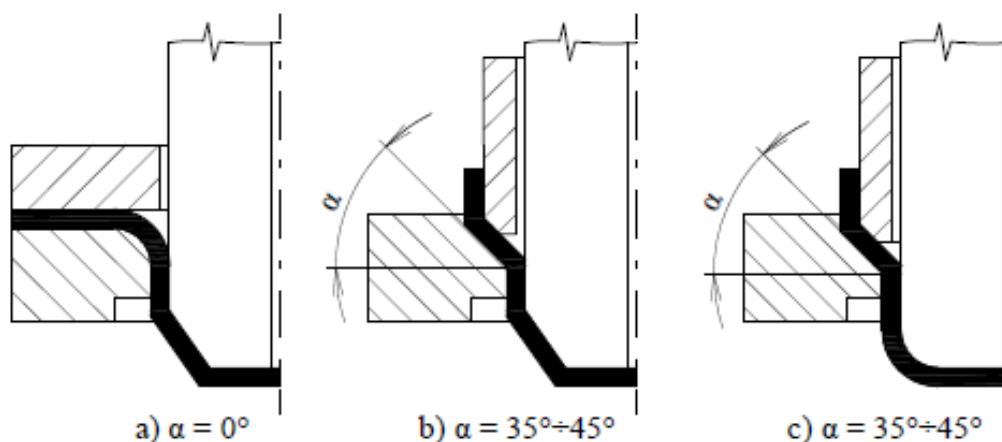
- brzdící (obr. 27) – se používají pro tažení velkých nepravidelných výtažků. Od žebér vtažovacích se liší tím, že zaoblené výstupky jsou umístěny jen v rovinných částech tažidla a brzděním usměrňují pohyb materiálu. Mohou být i v několika řadách za sebou. Přesné umístění a velikost žebra se určuje experimentálně při zkušebních tazích.



Obr. 27 Brzdící žebra [18]

2.6.4 Přidržovač [13], [18], [25]

Ve výrobě plní funkci přitlačování přístřihu k tažnici a tím brání tvorbě přeložek a vln plechu. Další funkcí je středění tažníku a zabraňuje mu ve vybočení v případě nebezpečí ztráty vzpěrné stability.



Obr. 28 Konstrukce přidržovačů [2]

V prvním tahu se používá rovného přidržovače, kde úhel $\alpha = 0^\circ$. Pro další tahy se k redukci odporu přístřihu při vtažování do tažnice používá kuželová přidržovací plocha a úhlu $\alpha = 30^\circ \div 45^\circ$. Konstrukce přidržovačů jsou vyobrazeny na obrázku 28. Pro jednočinné lisy se používají přidržovače pevné a pružinové, které jsou ovládány stejným pohybem beranu jako tažník. U dvojitých lisů je přidržovač ovládán vnějším beranem lisu.

2.6.5 Materiály tažných nástrojů [12], [18], [25], [26]

Jako hlavní konstrukční materiály pro tažné nástroje pracující za studena používají:

- konstrukční oceli – obvyklých jakostí jsou oceli tříd 10 a 11. Obvykle mají větší obsah síry a fosforu, obsahují taky určité množství manganu, chromu, mědi a jiných prvků. Tyto materiály se zpravidla tepelně nezpracovávají, pouze po svařování je vhodné provést žíhání.

Ušlechtilé konstrukční oceli tříd 12 ÷ 17, vyznačují větší čistotu a lepší vlastnosti než oceli obvyklých jakostí. Většinou se provádí tepelné zpracování, a proto se dodržuje předepsané chemické složení společně s mechanickými vlastnosti.

- šedé litiny – se používají pro základové části nástrojů. Litina 42 2421 se používá pro podkladové desky, základové příruby velkých tažných nástrojů, přidržovače pro velké dílce atd. Litina 42 2424 je používána na základové a upínací prvky vodících stojánků, přidržovače větších průměrů atd.
- oceli na odlitky – se používají v případech, kdy šedá litina již pevnostně nevyhovuje. Z uhlíkové oceli obvyklé jakosti se vyrábějí základové desky, přidržovače a jiné díly tažných nástrojů.
- nástrojové oceli – třídy 19 jsou vyráběné jen v elektrických pecích, které zaručují čistou a homogenní mechanické vlastnosti materiálu. Oceli pro tažné nástroje musí vykazovat dostatečnou tvrdost zároveň s houževnatostí a pevností v tlaku.

Používají se oceli uhlíkové, vhodné pro kalení na vysokou povrchovou pevnost. Je vhodná pro menší nástroje. Nevýhodou těchto oceli je nízká popouštěcí teplota, pohybující se kolem 200° ÷ 250°, při které ztrácí potřebnou tvrdost.

Slitinové nástrojové oceli obsahují přísady prvků, zvyšující prokalitelnost společně s odolností proti otěru. Tyto oceli nedosahují tak vysoké povrchové tvrdosti jako uhlíkové, ale mají vyšší odolnost vůči opotřebení.

Doporučené materiály pro tažné nástroj jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab. 7 Materiály tažných nástrojů [2]

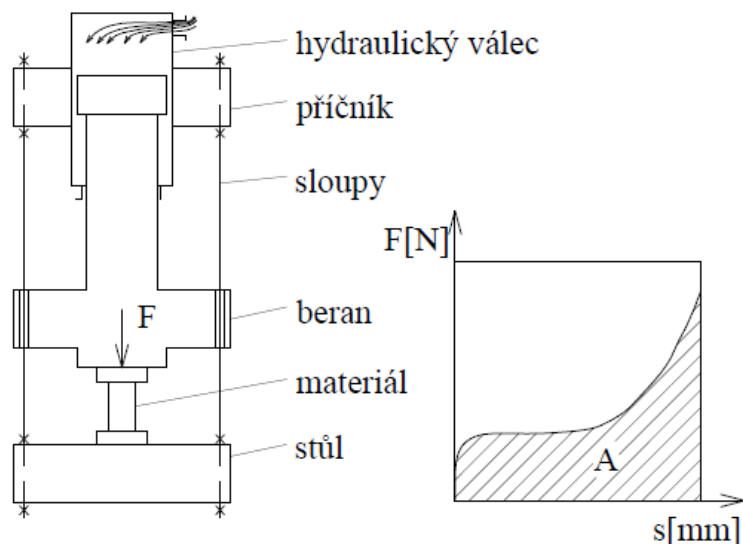
Část tažidla	Materiál
Tažníky, tažnice	12 061, 19 191, 19 436, 19 437
Základové desky	42 2424, 11 500, 11 370
Upínací desky	10 373, 11 373, 11 500
Zakládací kroužky	11 600
Přidrřovače	12 060, 19 191, 19 436

2.7 Stroje [10], [12], [16],

Výběr vhodného stroje je velmi důležitý vzhledem k požadovanému množství energie a práce. Při tažení je však nejdůležitějším parametrem síla a možnost jejího využití. Na volbu má také vliv, zda se jedná o lis jednočinný, dvojčinný neb trojčinný. Jednočinné lisy mají pouze jedno smykadlo a převážně používají k jednoduchým nástrojů. Dvojčinné stroje jsou vybaveny dvěma samostatnými smykadly a jsou vhodné pro tažení. Trojčinné lisy mají dvě horní a jedno spodní smykadlo, které koná tažné operace v opačném smyslu než horní smykadla. Pro tváření se využívají dva základní typy lisů:

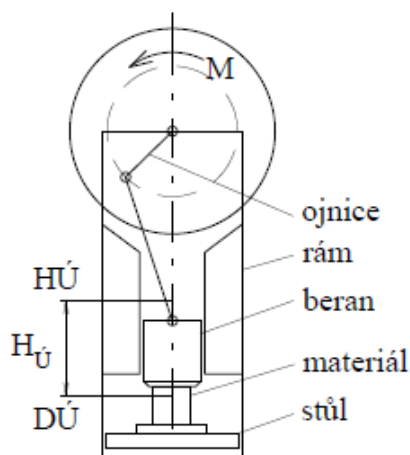
- hydraulické lisy – jsou stroje založené na rovnoměrném šíření tlaku kapalinou ve všech směrech. Pracovní síla se vyvozuje hydraulickým převodem tlakové energie pracovní kapalinou z energetického zdroje (čerpadlo). Mezi výhody hydraulických lisů patří malá rychlost tváření, při které nedochází k intenzivním zpevnění materiálu. Díky tomu lze rychlost lépe regulovat a jde sledovat proces tváření.

Tyto lisy nelze přetížít a není tak potřeba používat pojistky. Pracují klidně, bez hluku a otřesů. Nízká rychlost má však za následek delší tvářecí časy, a tedy nižší produktivita.

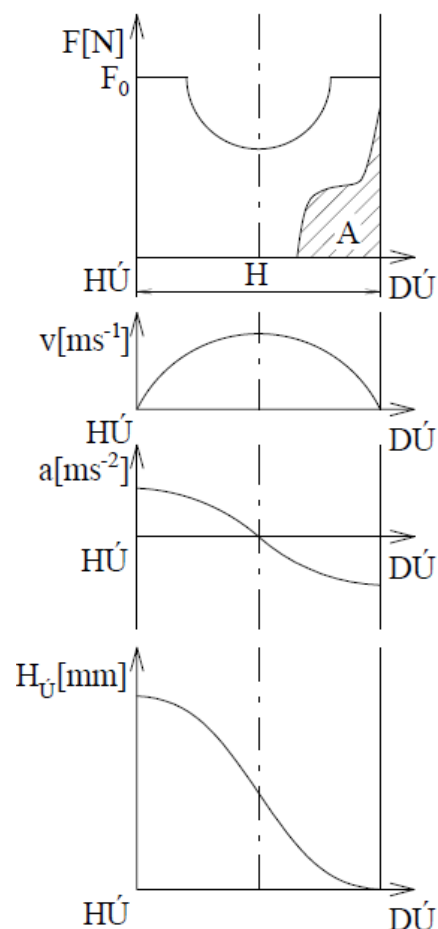


Obr. 29 Schéma hydraulického lisu [16]

- mechanické lisy – jsou poměrně jednoduché stroje s velkou výrobností. K vyvození síly na překonání deformačního odporu používají jak kinetickou, tak potenciální energii. Pro přenos energie se používají klikové, výstředníkové, kolenové, klínové a další mechanismy. Nevýhodou těchto lisů je odebrání maximální tvářecí síly, které je dosaženo těsně před dolní úvratí. Tváření velkou silou po delší dráze s těmito stroji je tedy obtížné z důvodu používaných mechanismů přenosu energie. Další nevýhodou proti hydraulickým lisům je nemožnost plynulé regulace. I s ohledem na tyto nedostatky jsou však tyto lisy v provozu nejpoužívanější.



Obr. 30 Schéma klikového lisu [16]



Obr. 31 Průběh síly, rychlosti, zrychlení a dráhy [16]

2.8 Maziva [12], [13]

Mazání při tažení zmenšuje tření mezi materiálem a nástrojem, ke zlepšení kvality povrchu. Dále snižuje napětí v kovu a také chrání výrobek od přilepování a škrábanců. Z výroby se nástroje většinou vyřazují z důvodu tvorby škrábanců a záděrů a jiných poškození na povrchu lisovaných součástí.

Nemaže se celý přístřih, ale pouze ze strany tažnice. Na straně tažníku je naopak vhodné mít tření co nejvyšší.

Mazivo musí na povrchu dobře přilnout a vytvořit rovnoměrnou, pevnou, nevysychající vrstvu, která je schopná vydržet značné tlaky. Dále by mělo být chemicky stálé. Nesmí mechanicky ani chemicky poškozovat povrch výtažku a nástroje. Po tažení by mělo jít snadno ze součásti odstranit.

Pro tažení existuje velké množství maziv různého složení, které lze rozdělit na dvě základní skupiny: na maziva bez plnidel a maziva s plnidly. Experimentálně bylo zjištěno, že maziva bez plnidel jsou nedávají dostatečně pevnou vrstvu a relativně snadno se vytlačují ven z prostoru mezi tažnicí a výtažkem. Jako nejvhodnější se tak jeví maziva s velkým obsahem plnidel (křída, mastek, tuha), která zvětšují trvanlivost nástrojů až 5× ve srovnání s trvanlivostí při použití maziva bez plnidel.

Základní druhy maziv používaných pro tažení jsou:

- maziva kapalná – jsou synteticky vyrobené organické oleje. Mají dobré mazací vlastnosti, ale jejich nevýhodou je vysoká cena. Ve vodě rozpustné oleje se užívají k vytváření olejových emulzí.
- maziva konzistentní – jsou mazací tuky. Nositelem mazacích vlastností je minerální olej a mastná přísada, jejíž přilnavost je žádoucí. Používá se pro nenáročný tahy a při tažení barevných kovů.
- maziva tuhá – mají nepatrnou tuhost a velkou afinitu ke kovům. Používají se jako přísady k běžným mazivům při tažení hlubokých nebo složitých dílců.

2.9 Technologické aplikace tažení plechu [1], [3], [12], [14], [30], [31], [32]

Kromě válcových dílců se tažením vyrábějí ve strojírenské praxi celá řada rozmanitých obecných tvarů. Jejich výroba má svá specifika a při srovnání s válcovými výtažky bývá zpravidla náročnější. Stejně tak je i náročnější jejich návrh výroby, při kterém se velmi často využívá numerických simulací tvářecího procesu.

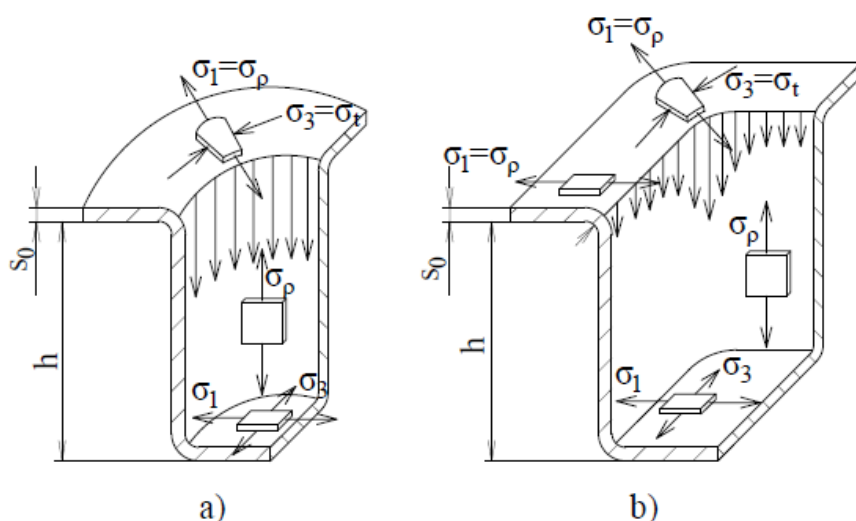
Obecných tvarů výtažků je nepřehledné množství, a proto jsou uvedeny jen některé základní tvary:

- hranaté – výtažky mají při tažení zcela odlišné technologické podmínky v porovnání s výtažky válcových tvarů. Projevují se rozdílným stavem napjatosti v rohovém zaoblení a ve svislých stěnách. Na obrázku 32 jsou znázorněny části válcového a pravoúhlého výtažku. V obou případech lze předpokládat plošný stav napjatosti v přírubě. U válcového výtažku se nemění velikost ani směr napětí, které je rozloženo rovnoměrně. Pravoúhlá součást má v rohové oblasti rozdílnou velikost i směry napětí. Klesají a odchylojí se od radiálního směru k navazujícím bočním stěnám.

V plášti výtažků je napjatost jednoosá tahová, u válcového je navíc rozložena rovnoměrně. U pravoúhlého výtažku je však v rohové části maximální a postupně klesá směrem k boční rovné stěně. Maximální hodnota tohoto napětí z rohové oblasti je však menší než maximální napětí v plášti válcového výtažku.

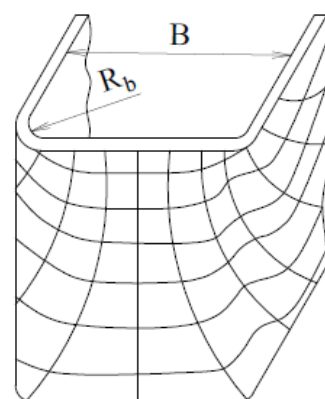
U hranatých výtažků se v rozích uvažuje stejný napěťový stav jako u válcového výtažku o stejném poloměru zaoblení a na rovných stěnách je podobný ohýbání.

Ve skutečnosti jsou rovné stěny vystaveny složitějšímu deformaci a napjatosti.



Obr. 32 Schéma napětí válcového a hranatého výtazku [3]

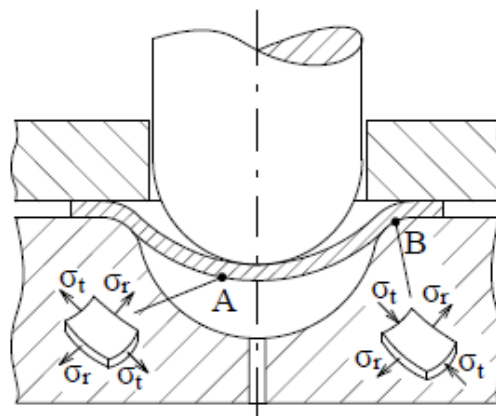
Na obrázku 33 je znázorněna deformace pravoúhlé souřadnicové sítě, nanesené na povrch polotovaru před tvářením. Je patrné, že boční stěny výtazku se nejen ohýbají, ale taky v nich vznikají složitější deformace, které se skládají ze stlačení části podél obvodu, z prodloužení ve svislém směru a z určitého zvětšení tloušťky stěn v horní části výtazku. Největší deformace jsou v rohových oblastech.



Obr. 33 Deformace souřadnicové sítě [1]

Opravdové tažení probíhá tedy pouze v rozích součásti za podobných podmínek, jako u tažení kruhových výtazků. S rostoucí vzdáleností od rohů se velikost zpevněné zmenšuje, až do místa, kde je deformace tvořená pouze ohybovou složkou. Díky proměnlivému zatížení tahem a tlakem dochází k stranovému úniku kovu, při němž se materiál přesouvá z oblastí s větším zatížením do míst s menším zatížením. Boční stěny hranatých výtazků mají menší deformaci, nižší tangenciální napětí a tím vyšší stabilitu než stěny rotačních výtazků.

- sférické – výtazky s vypouklým dnem jsou obtížnější na výrobu než výtazky válcové, protože v tomto případě dochází k velkým deformacím tvarového dna součásti. Z obrázku 34 je zřejmé, že v počáteční fázi tažení je velká, nepřidržená plocha přístřihu, kterého se tažník dotýká pouze v jednom bodě. Během tažení může tedy dojít k radiálnímu zvlnění v této ploše.

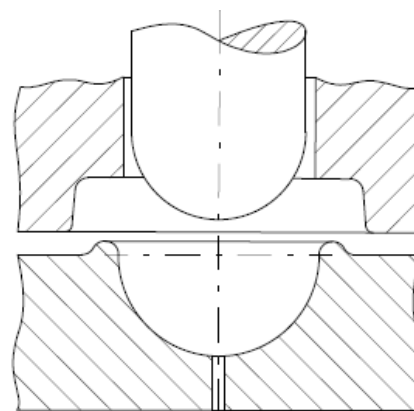


Obr. 34 Schéma tažení a napjatosti u sférického tažení [3]

U tohoto typu tažení dochází k intenzivnímu tváření v části výtazku, která je v kontaktu s tažníkem.

Ve stykové ploše v místě 'A' vyobrazeného na obrázku 34, vzniká stejnorodá plošná napjatost. Ta vyvolá ztenčení stěny přístřihu a při určitých podmínkách může dojít k porušení soudržnosti. Následně dochází k prasknutí materiálu. V místě 'B' vzniká radiální tahové napětí společně s tlakovým napětím.

Výrobu sférických výtahů lze rozdělit na několik způsobů, které jsou zaměřeny na zmenšení efektu zvlnění. Používá se tažení na jednu operaci s užitím obráceného tažení, tažení s dvojitým přehybem a tažení s brzdící lištou (obr. 35). Víceoperační tažení nelze doporučit pro velké množství závad jako je proměnlivá tloušťka stěny, vrásky, nevyhlazené stopy po stupních. K odstranění těchto vad je potřeba dodělat výlisky kroužlením.

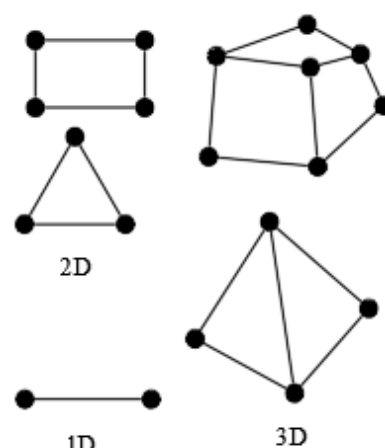


Obr. 35 Tažení s brzdící lištou [3]

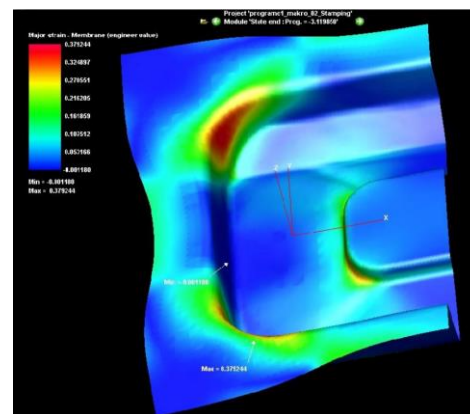
2.10 Numerická simulace [30], [31], [32], [43]

K nejuniverzálnějším metodám numerických simulací se řadí metoda konečných prvků (MKP), která je v současnosti považována v tvářecích procesech za nejvýkonnější. Její největší výhodou je možnost použití k široké škále úloh bez omezení, která vyplývají z geometrie součástí. Možnosti její analýzy pokrývají celou šíři aplikací: statiku, dynamiku a různé další oblasti. Tyto problémy řeší soustavou lineárních rovnic, jejíž řešení lze efektivně provádět s použitím výpočetní techniky. Základním principem MKP je diskretizace tělesa na malé části, které jsou matematicky jednoduše popsatelné. Jejich příklady jsou vyobrazeny na obrázku 36. Po rozdělení tělesa na geometrické prvky vznikají v jejich rozích nebo na hranách uzly. Podmínkou pro řešení je znalost okrajových podmínek v krajních uzlech. Pak při funkční závislosti proměnných v jednotlivých uzlech se postupně dopočítává řešení ve všech uzlech. Přesnost výpočtu je ovlivněna velikostí a tvarem geometrických prvků. MKP využívá mnoho simulačních programů: ANSYS, LS-DYNA, PAM-STAMP a další.

Software PAM-STAMP je vhodný pro technologii plošného tváření, ale je možné ho používat v mnoha dalších odvětvích. Celý balík PAM je založen na stavebnicovém principu. Specializované moduly pracují samostatně a mohou se libovolně rozšiřovat. Při práci se softwarem je důležité věnovat pozornost vytváření modelu, diskretizaci a určení materiálového modelu. Důležité je rovněž posouzení, zda jsou výsledky technicky přijatelné.



Obr. 36 Příklad prvků sítě MKP [31]



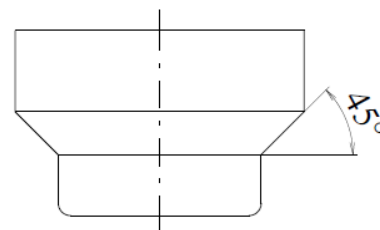
Obr. 37 Výsledky simulace PAM-STAMP [30]

2.11 Technologičnost [1], [10], [12]

Z hlediska kvality a ekonomičnosti výroby je důležité, aby byl tvar výtažku co nejjednodušší. Složitě tvary zvyšují počet operací, tím prodražují cenu nástroje a výrobu.

Při konstruování výtažků je důležité dodržovat následující zásady:

- při tažení odstupňovaných výtažků by neměl být příliš velký rozdíl dvou sousedních průměrů. V případě nutnosti se jeví jako vhodnější varianta rozdělit díl na dvě části a následně je spojit lisováním nebo svařením.
- u velkých a středních součástí by měl mít obrys příruby stejný nebo podobný tvar jako výtažek.
- u tažení dílů se širokou přírubou se zvyšuje počet tažných operací, a proto je nutné mezi jednotlivé operace zařadit mezioperační žihání. Z toho důvodu se podle možností doporučuje nenavrhopat příliš široké příruby dílců.
- při tažení součásti s přírubou se však musí dodržovat pravidlo nejmenší šířky příruby. Pro průměr příruby 'D' musí platit $D \geq d + 1,2 \cdot s$.
- nezvyšovat výšku výtažku zbytečně, protože každé zvýšení vede k navýšení počtu tahů a s tím spojené je také tepelné zpracování.
- přechodové poloměry mezi dnem a pláštěm, pláštěm a přírubou nebo mezi stěnami hranatých výtažků nemůžou být libovolné a odvíjí se podle zásad konstruování tažných nástrojů. Pro menší poloměry se zařazuje kalibrace poloměrů po tažení.
- předepisování tolerancí na tloušťku stěny se doporučuje jen v nutných případech.
- otvory ve výtažku se mohou děrovat pouze v případě, že střed otvoru je od hrany výtažku ve vzdálenosti $h_d \geq s + 2 \cdot d_{otv}$, kde d_{otv} je průměr daného otvoru.
- přechody na odstupňovaných výtažcích musí být kuželové, zkosené pod úhlem 45° , jak je znázorněno na obrázku 38.
- velké ploché části výtažků nebývají zpravidla tuhé, a proto by se měly vyztužovat vhodným tvarováním jako je lemování, žlábkování. Pro rozestupy mezi prolisy by mělo platit, že rozestup by neměl být větší než trojnásobek šířky prolisu a jejich vzdálenost od kraje by neměla být menší než trojnásobek tloušťky plechu.
- dle možností nepředepisovat vyšší přesnost dílců, než je běžně dosažitelná u tažení. U hlubokotažných plechů se dosahuje přesnosti IT12÷IT16, při použití hliníku nebo mosaze je možno dosáhnout na IT9÷IT11. Pro vyšší přesnost je nutné jemnější odstupňování tahů a kalibrování.



Obr. 38 Přechod mezi průměry [10]

3 NÁVRH VÝROBY [7], [8], [9], [25]

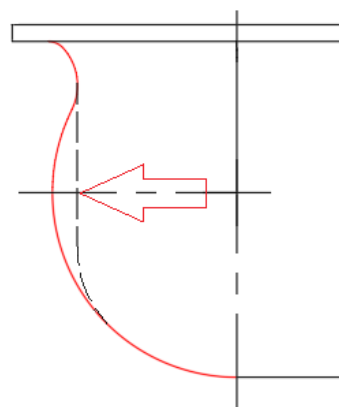
Řešenou součástí je kryt tažného kloubu zobrazeného v sestavě na obrázku 39. Kryt bude vyráběn z uhlíkové oceli 11 320 v sérii 50 000 kusů ročně. Půdorysné rozměry jsou 262,5 x 67 mm. Ostatní rozměry jsou uvedeny na výkresu 2020-DP-171088-1.

Polotovár se bude vyrábět řezáním pomocí laseru. Tato technologie byla zvolena z důvodu vysoké rezní rychlosti, kvality rezní plochy a vysoké přesnosti. K výrobě krytu bude použita technologie hlubokého tažení společně se stříháním. Po vytvoření základního tvaru tažením a stříháním je dále nutné do výroby zařadit i další operace. Proto bude následovat ostřížení obvodu součásti a poté budou laserem vyřezány boční otvory. Jako poslední operace bude zařazena povrchová úprava, a to žárové zinkování. V praktické části bude řešena pouze výroba základního tvaru tažením.

Z hlediska posouzení technologičnosti a zvolené metodě výroby je vhodně zvolen materiál. Vyhovuje z hlediska mechanických vlastností a rovněž ze strany náročnosti tažení. Vzhledem k použití vyráběné součásti nejsou na výkrese předepsány žádné tolerované rozměry, a tak se bude vyrábět podle ISO 2768-m. Technologickým problémem bude tvorba přední vypouklé části znázorněné na obrázku 40. Kvůli vzájemnému přechodu zaoblení nebude možné součást vyrobit v jednom tahu. V prvním tahu se vyrobí hranatá část součásti společně s oválným tvarem na druhé straně součásti. Ve druhé operaci se prostříhnou otvory na vrchní straně krytu a zároveň se vyrobí lem na hranatém otvoru. V poslední operaci se zhotoví přední vypouklá část s vzájemným přechodem zaoblení. Pro tuto operaci bude nutné použít klínový mechanismus pro zajištění změny vertikálního pohybu beranu lisu na horizontální pohyb tvářecího nástroje. Klínový mechanismus bude nutné použít i pro vyhazovač, které hotovou součást vysune z tažnice v horizontálním směru. Pro dosažení požadovaného tvaru bude vhodné použití vícečinného lisu.



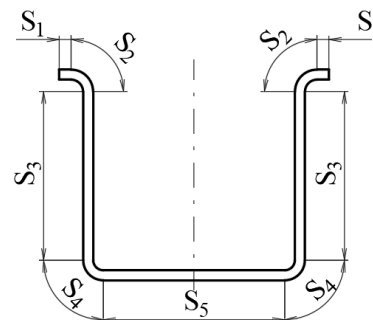
Obr. 39 Sestava tažného kloubu



Obr. 40 Znázornění vypouklé části

3.1 Velikost polotovaru [3], [12], [14],

Určení správné velikosti polotovaru je z hlediska technologie a ekonomičnosti výroby zcela zásadní. Pro výpočet bude použita metoda rovnosti ploch. Vyráběnou součást lze rozdělit na dvě části. Hranatá, u které bude při tváření v podstatě docházet pouze k ohybu, a proto bude pro tuto část udělán rozvin. Další částí je sférická, u které se velikost polotovaru počítá obdobně jako u rotačních výtažků. Po výpočtu jednotlivých částí se tyto části spojí a následně se určí výchozí polotovár.



Obr. 41 Rozdělení hranaté části na plochy 'S_i'

Na obrázku 41 je znázorněno rozdělení hranaté části na jednotlivé plochy. Pro výpočet polotovaru bylo zjednodušeno zaoblení v přední části na pravidelný tvar vyplývající z obrázku 41. Pak lze rovné plochy této části určit:

$$S_i = a_i \cdot b_h \quad (3.1)$$

kde: a_i – šířky jednotlivých ploch [mm],
 b_h – délka hranaté části výtažku [mm].

Zaoblené plochy se pak určí dle vztahu:

$$S_i = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r_i \cdot b_h \quad (3.2)$$

kde: r_i – zaoblení výtažku [mm].

Pak lze spočítat jednotlivé plochy:

$$S_1 = a_1 \cdot b_h = 3 \cdot 229 = 687 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = \frac{1}{2} \pi \cdot r_1 \cdot b_h = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 229 = 1\,079,2 \text{ mm}^2$$

$$S_3 = a_2 \cdot b_h = 42 \cdot 229 = 9\,618 \text{ mm}^2$$

$$S_4 = \frac{1}{2} \pi \cdot r_2 \cdot b_h = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 5,5 \cdot 229 = 1\,798,5 \text{ mm}^2$$

$$S_5 = a_3 \cdot b_h = 45 \cdot 229 = 10\,305 \text{ mm}^2$$

Celková plocha se pak určí jako součet:

$$S_h = 2 \cdot (S_1 + S_2 + S_3 + S_4) + S_5 \quad (3.3)$$

kde: S_h – plocha hranaté části [mm²].

$$S_h = 2 \cdot (687 + 1\,079,2 + 9\,618 + 1\,798,5) + 10\,305 = 36\,670,6 \text{ mm}^2$$

Z této plochy je pak možné díky známé délce 'b' určit i šířku polotovaru této části:

$$a_c = \frac{S_h}{b} \quad (3.4)$$

kde: a_c – šířka polotovaru [mm].

$$a_c = \frac{36\,670,6}{229} = 160,2 \text{ mm}$$

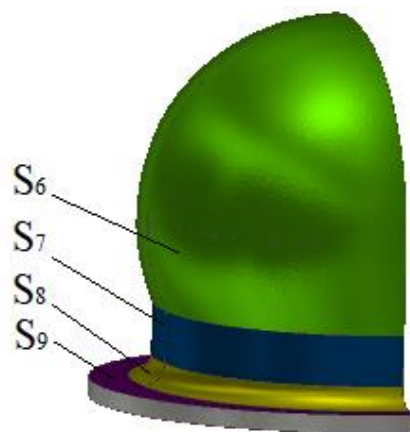
Při tažení může dojít u volného konce této části ke zdeformování a uhnutí spodku součásti. Dále nebylo uvažováno ostřížení v této části. Proto bude rozměr 'b' zvětšen o 10 mm na $b_h = 239$ mm. Celkový rozměr polotovaru pro tuto část má tedy rozměr 239 x 161 mm.

Pro výpočet polotovaru byla sférická část zjednodušena a rozdělena na jednotlivé plochy dle obrázku 42. Kulová plocha 'S₆' se vypočítá dle následujícího vztahu:

$$S_6 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot d_k \cdot v \quad (3.5)$$

$$S_6 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 55 \cdot 40 = 3\,455,8 \text{ mm}^2$$

kde: d_k – průměr kulové plochy [mm],
 v – výška kulové plochy [mm].



Obr. 42 Rozdělení sférické části

Válcová plochu 'S₇' pak dle vztahu:

$$S_7 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot d_v \cdot h_v \quad (3.6)$$

kde: h_v – výška pásu [mm].

$$S_7 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 55 \cdot 7,5 = 648 \text{ mm}^2$$

Plocha zaoblení se vypočítá podle vzorce:

$$S_8 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot 2 \cdot r}{4} \cdot \pi \cdot d \quad (3.7)$$

kde: r – poloměr zaoblení [mm].

$$S_8 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot 2 \cdot 3}{4} \cdot \pi \cdot 55 = 407,1 \text{ mm}^2$$

Plocha příruby se vypočítá dle vzorce:

$$S_9 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (R_p^2 - r_p^2) \quad (3.8)$$

kde: R_p – poloměr většího kraje příruby [mm],
r_p – poloměr vnitřního kraje příruby [mm].

$$S_9 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (33,5^2 - 30,5^2) = 301,6 \text{ mm}^2$$

Celková plocha sférické 'S_s' části je pak:

$$S_s = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (3.9)$$

$$S_s = 3\,455,8 + 648 + 407,1 + 301,6 = 4\,812,5 \text{ mm}^2$$

Z plochy 'S_s' lze určit potřebnou velikost plechu:

$$R_{př} = \sqrt{\frac{8 \cdot S}{\pi} \cdot \frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 4\,812,5}{\pi} \cdot \frac{1}{2}} = 55,35 \div 55,4 \text{ mm} \quad (3.10)$$

kde: R_{př} – poloměr přístřihu sférické části [mm].

Plocha polotovaru se spočítá součtem ploch 'S_h' a 'S_s':

$$S = S_h + S_s \quad (3.11)$$

$$S = 36\,670,6 + 4\,812,5 = 41\,483,1 \text{ mm}^2$$

Plocha přístřihu byla určena na 41 483,1 mm². Pro porovnání přesnosti výpočtu byla plocha přístřihu určena dle softwaru Autodesk Inventor 2017 a výsledná hodnota je 41 188,5 mm². Určené plochy jsou tedy téměř totožné. Při výpočtu bylo dosaženo chyby v řádu setin procenta, což je zcela zanedbatelné. Dále se bude počítat s hodnotou určenou výpočtem.

Šířka plechu pro hranatou část je větší než pro sférickou. Z toho důvodu bude přístřih ve stejné šířce jako plech pro hranatou část a tedy 161 mm. K délce 239 mm se přičte hodnota 'R_{př}' a dostaneme délku přístřihu 294,4 mm.

Zjištěné rozměry je třeba zvětšit kvůli ostřížení, které následuje po tažení. Doporučené přídávky na ostřížení jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8 Přídavky na ostřížení výtažku [14]

Tloušťka materiálu [mm]	Maximální rozměr výtažku [mm]		
	100 ÷ 200	200 ÷ 300	nad 300
do 2	2,5 – 3,0	3,0 – 3,5	3,5 – 4,0
2 ÷ 3	3,5 – 4,0	3,5 – 4,0	4,0 – 4,5
3 ÷ 5	4,0 – 5,0	4,5 – 5,5	5,0 – 6,0

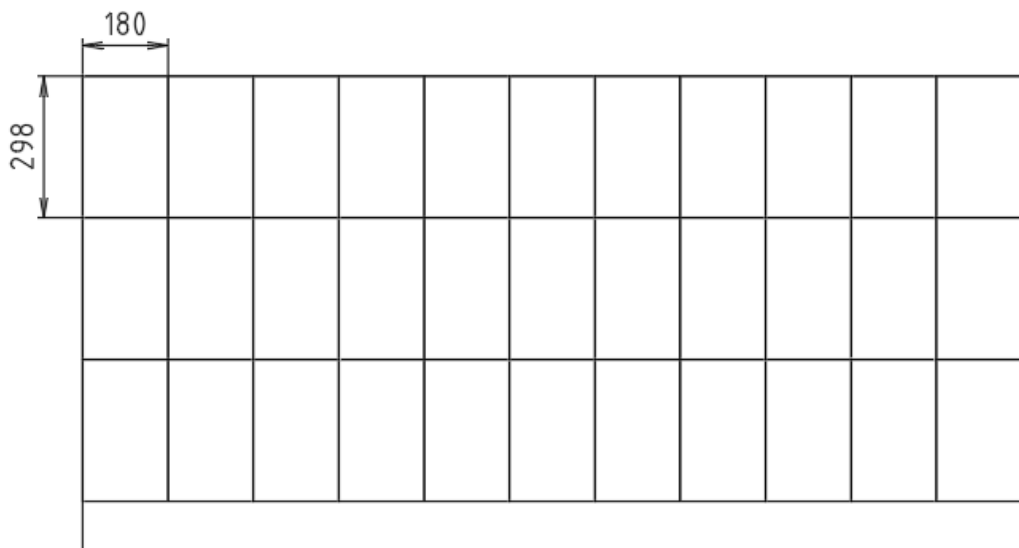
Dle tabulky 8 byly zvoleny přídavky 3,5 – 4,0 mm. Po připočtení k předchozím rozměrům dostáváme rozměr polotovaru, který má velikost 298 x 165 mm.

Při následných simulacích bylo však zjištěno, že určená šířka polotovaru není dostatečná a je třeba ji zvětšit o 15 mm. Pak je tedy konečná velikost polotovaru 298 x 180 mm.

3.2 Nástřihový plán [23], [27], [28], [29]

Pro výrobu tažením se hutní materiál používá ve formě svitků nebo tabulí plechů. Svitky jsou používány při sériové výrobě součástí menších rozměrů. Ke zpracování je třeba linky, obsahující rovnací a vřahovací zařízení, a pro řezání laserem jsou tedy nevhodné.

Pro výrobu polotovaru řezáním na laseru jsou vhodnější tabule plechu, jelikož umožňují nižší náklady na zpracování. Plechy o tloušťce 2,5 mm se dodávají v rozměrech 2000 x 1000 mm, 2500 x 1250 mm a 3000 x 1500 mm. Volba velikosti tabule závisí na vhodném rozmístění polotovarů a celkovém využití materiálu. Při správně nastaveném řezném procesu je řezná spára velmi úzká, až 0,05 – 0,5 mm. Je tak propálené jen malé množství materiálu. Vzhledem k tomu že přídavky na ostřížení byly voleny maximální, není potřeba mezi jednotlivými polotovary žádné můstky, jak je tomu například u stříhání. Rozměry polotovaru byly učeny na 298 x 180 mm. Příklad příčného rozvržení nástřihového plánu na tabuli o rozměrech 2000 x 1000 mm je zobrazen na obrázku 43.



Obr. 43 Nářezový plán příčného uložení na tabuli 2000 x 1000

Pro výpočet využití materiálu je třeba znát plochu tabule:

$$S_{pl} = l_{pl} \cdot h_{pl} = 2000 \cdot 1000 = 2\,000\,000 \text{ mm}^2 \quad (3.12)$$

kde: S_{pl} – plocha tabule plechu [mm^2],

l_{pl} – délka tabule plechu [mm],

h_{pl} – šířka tabule plechu [mm].

Dále je třeba znát plochu polotovaru:

$$S_{po} = l_{po} \cdot h_{po} = 298 \cdot 180 = 53\,640 \text{ mm}^2 \quad (3.13)$$

kde: S_{po} – plocha polotovaru [mm^2],
 l_{po} – délka polotovaru [mm^2],
 h_{po} – šířka polotovaru [mm^2].

Nyní lze již spočítat procentuální využitelnost tabule:

$$\mu = \frac{i_{po} \cdot S_{po}}{S_{pl}} \cdot 100 = \frac{33 \cdot 53\,640}{2\,000\,000} \cdot 100 = 88,51 \% \quad (3.14)$$

kde: μ – procentuální využití materiálu [%],
 i_{po} – počet polotovarů na tabuli plechu [ks].

Využití tabule o rozměru 2000 x 1000 mm s příčným uložením polotovaru tedy je 82,94 %. Stejným způsobem byly spočítány všechny možnosti zahrnující výše zmíněné velikosti plechu a rozložení polotovarů. Konečné výsledky jsou v tabulce 9.

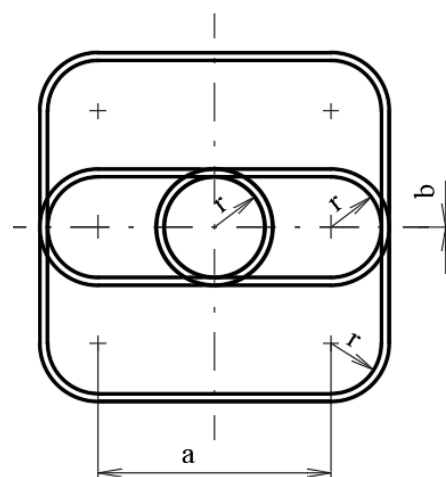
Tab. 9 Souhrn výsledků využitelnosti tabulí

Tabule plechu [mm]	Uspořádání	Počet polotovarů [ks]	Využití [%]
2000 x 1000	podélné	30	80,46
	příčné	33	88,51
2500 x 1250	podélné	48	82,39
	příčné	52	89,26
3000 x 1500	podélné	80	95,36
	příčné	80	95,36

Z tabulky 10 se jako nejvhodnější rozměr tabule jeví 3000 x 1500 mm s podélným rozložením, při kterém je dosaženo využitelnosti materiálu 95,36 %.

3.3 Součinitel tažení a počet tažných operací [12], [14], [17]

Tažení hranatých nádob v první operaci je v určité podobnosti s tažením válcových nádob, jak je patrné z obrázku 44. Zde jsou zobrazeny tři půdorysy nádob čtvercové, oválné a válcové, které mají stejný poloměr zaoblení 'r'. V případě, že $b = 0$ přechází čtvercová nádoba v oválnou a při $b = a = 0$ se mění ve válcovou nádobu. U nádoby čtvercové odpovídá její zaoblení v rozích čtvrtině válcové nádoby. Proto lze při stanovení součinitele tažení hledat určitou podobnost. Zadaná součást se svým tvarem nejvíce blíží oválné nádobě. Na straně s kulovou plochou je až na dno téměř totožná. Druhá strana je hranatá, a navíc zde chybí boční stěna. Proto bude posuzována jako oválná součást s rozměrem $a = 235 \text{ mm}$, $r = 25 \text{ mm}$. Součinitel tažení se pak určí dle tabulky 10, kde jsou hodnoty koeficientů tažení pro oválné nádoby.



Obr. 44 Porovnání tažení kruhové a nekruhové nádoby [14]

Tab. 10 Hodnoty součinitele tažení 'm₁' pro tažení oválných nádob [17]

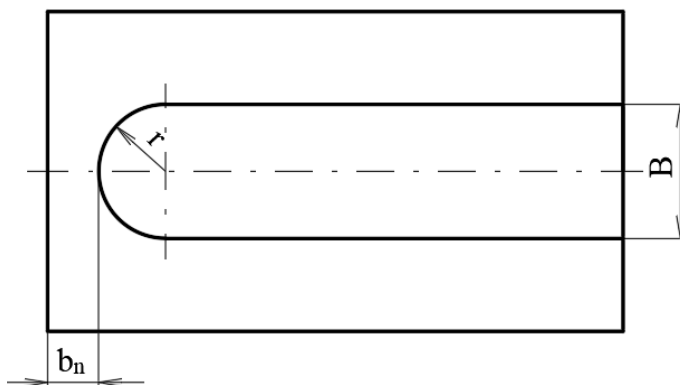
Délka 'a'	Poměrná tloušťka [%]		
	1 ÷ 1,5	1,5 ÷ 2,0	nad 2,0
8r	0,44	0,42	0,40
9r	0,43	0,41	0,39
10r	0,42	0,40	0,38

K určení součinitele tažení je třeba znát poměrnou tloušťku, která se určí dle vztahu (2.17), kde 'd₀' označuje šířku polotovaru:

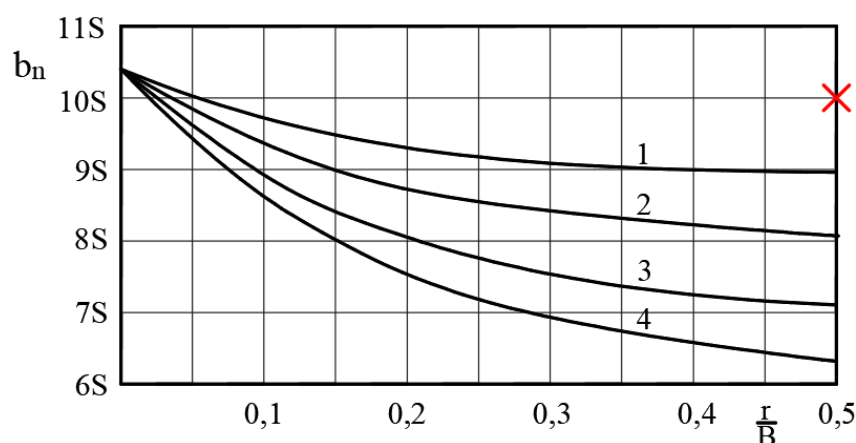
$$P = \frac{2,5}{160} \cdot 100 = 1,56\%$$

Dále je třeba znát délku 'a', vyjádřenou pomocí poloměru 'r', která byla stanovena na a = 9r. Pak lze z tabulky 10 určit součinitel tažení m₁ = 0,41.

K důležitým parametrům návrhu patří stanovení počtu tažných operací. Diagram na obrázku 46 sestrojil Romanovskij [12]. Diagram udává změnu rozměru 'b_n' podle rohového poměru a počtu tažných operací, jelikož zvýší-li se jejich počet, zvyšuje se taky zpevnění kovu a dovolený součinitel napětí. Vyznačený bod v diagramu představuje zadanou součást a leží v oblasti pro jeden tah. Dílec lze tedy vyrobit v jedné tažné operaci. Tím ale bude získám pouze nedokončený polotovar, jelikož sloučit výrobu součásti do jednoho tahu není možné. Pro výrobu vypouklé části bude proto zařazen i druhý tah.



Obr. 45 Znárodnění vzdálenosti 'b_n'



Obr. 46 Závislost rozměru 'b_n' na poloměru 'r/B' a počtu tahů [12]

3.4 Volba tažné mezery a přídržovače [12], [13], [17]

Tažná mezera závisí především na tloušťce materiálu a pořadí tažné operace. Vzhledem k tomu, že se v prvním tahu vytváří oválná nádoba, je možné tažnou mezery pro první tah určit stejně jako pro rotační výtažky:

$$z_1 = 1,3 \cdot s_0 = 1,3 \cdot 2,5 = 3,25 \text{ mm}$$

U druhých a dalších tazích se tažná mezera postupně zmenšuje a nejmenší je zpravidla při posledním tahu. Proto bude u následující operace zvolen menší koeficient než v předchozím případě a vzhledem k tomu, že druhý tah je zároveň posledním tahem, bude zvolen koeficient o velikosti 1,1:

$$z_2 = 1,1 \cdot s_0 = 1,1 \cdot 2,5 = 2,75 \text{ mm}$$

Pro první tah je tedy tažná mezera $z_1 = 3,25 \text{ mm}$ a pro druhý tah $z_2 = 2,75 \text{ mm}$.

Přídržovač brání zvlnění materiálu na přírubě během tažení a pro výrobu hlubokých výtažků je prakticky nezbytný. Přídržovač bude použit pouze v prvním tahu, a hlavní význam bude mít v oblasti zaoblení oválného tvaru. Proto bude přídržovač volen dle postupu pro válcové výtažky dle (2.23) a podmínky (2.24):

$$u = 50 \cdot \left(q - \frac{\sqrt{s_0}}{\sqrt[3]{D}} \right) = 50 \cdot \left(1,9 - \frac{\sqrt{2,5}}{\sqrt[3]{160}} \right) = 80,4$$

$$u \geq \frac{100 \cdot d_1}{D}$$

$$80,4 \geq \frac{100 \cdot 55}{160} = 34,5$$

Součinitel 'u' podmínku jasně splňuje, a proto je nutné použít přídržovač. Tlak přídržovače se volí dle tabulky 6 a byl zvolen tlak $p_p = 2 \text{ MPa}$. Dále pro výpočet přídržovací síly je nutné znát plochu přídržovače ' S_p ', která se vypočítá následovně:

$$S_p = l_{po} \cdot h_{po} - \left(\frac{\pi \cdot (t + 2 \cdot s_0 + 2 \cdot r_{tc})^2}{4 \cdot 2} + l_{hc} \cdot (t + 2 \cdot s_0 + 2 \cdot r_{tc}) \right) \quad (3.15)$$

kde: S_p – plocha přídržovače [mm^2],

l_{po} – délka polotovaru [mm],

h_{po} – šířka polotovaru [mm],

l_{hc} – délka hranaté části výtažku [mm],

t – šířka nástroje [mm].

$$S_p = 298 \cdot 180 - \left(\frac{\pi \cdot (50 + 2 \cdot 2,5 + 2 \cdot 3)^2}{4 \cdot 2} + 239 \cdot (50 + 2 \cdot 2,5 + 2 \cdot 3) \right) = 37\,599,8 \text{ mm}^2$$

Nyní lze již určit sílu přídržovače (2.28):

$$F_p = p_p \cdot S_p = 2 \cdot 37\,599,8 = 75\,199,6 \text{ N} \approx 75,2 \text{ kN}$$

Přídržovací síla byla určena na $F_p = 75,2 \text{ kN}$. Tuto sílu je však nutné ověřit simulací nebo experimentálně vyzkoušet při zkušební sérii. V případě potřeby ji upravit pro správnou funkci přídržovače.

3.5 Rozměry technologického otvoru [17]

Pro výrobu lemu hranatého otvoru je třeba stanovit rozměry technologického otvoru. Lem bude zhotoven technologií rozšířením otvoru ohybem okrajů. Proto je nutné spočítat jeho rozměry tak aby bylo po lemování dosaženo požadovaných rozměrů:

$$\rho_o = r_o + b \cdot s_o = 2 + 0,42 \cdot 2,5 = 3,05 \text{ mm}$$

$$l = \frac{\rho_o \cdot \pi \cdot \gamma}{180} = \frac{3,05 \cdot \pi \cdot 90}{180} = 4,79 \text{ mm}$$

Velikost technologického otvoru se pak určí rozdílem konečného otvoru a dvounásobkem hodnoty 'l':

$$l_t = 45 - 2 \cdot 4,79 = 35,4 \text{ mm}$$

$$s_t = 25 - 2 \cdot 4,79 = 15,4 \text{ mm}$$

kde: l_t – délka technologického otvoru [mm],

s_t – šířka technologického otvoru [mm].

Pro lemování je nutné tento otvor v rozích zaoblit, aby byl lem vyrobitelný. Poloměr zaoblění bude určen pomocí výpočtu pro kruhový otvor, který nahradí zaoblění ze všech čtyř rohů:

$$d_{to} = D_z - 2 \cdot (H - 0,43 \cdot r_1 - 0,72 \cdot s_o) \quad (3.16)$$

kde: d_{to} – průměr otvoru před lemováním [mm],

D_z – průměr středu zaoblění [mm],

H – celková výška lemu [mm],

r_1 – rádius zaoblění lemu [mm].

$$d_{to} = 8,5 - 2 \cdot (4,5 - 0,43 \cdot 2 - 0,72 \cdot 2,5) = 4,8 \text{ mm}$$

Z předchozího výpočtu je patrné, že poloměr zaoblění technologického otvoru je roven polovině hodnoty ' d_{to} '. Otvor se bude stříhat o velikosti 35,4 x 15,4 mm se zaoblěním v rozích o velikosti 2,4 mm.

3.6 Výpočet síly a práce [1], [2], [12], [17], [33]

Tažná síla je důležitý aspekt tvářecího procesu, podle kterého se následně navrhuje nástroj, ale taky se dle něj určuje vhodný stroj pro výrobu. Při výpočtu tažné síly složitější dílce se zpravidla předpokládá, že v rozích dochází k tažení a na rovných úsecích pouze k ohybu. Potom se tažná síla pro první operaci určí:

$$F_{t1} = (F_t + F_o) \cdot k_o \quad (3.17)$$

kde: F_t – tažná síla k vytažení zaoblění [N],

F_o – síla na ohyb rovných stěn [N],

k_o – opravný koeficient [-] ($k_o = 1,1 \div 1,2$).

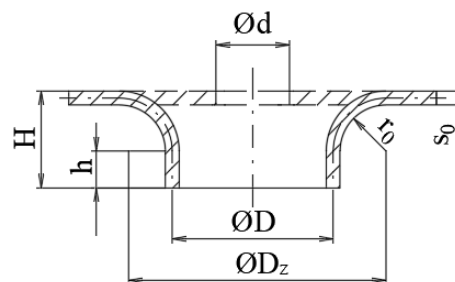
Síla ' F_t ' se stanoví dle vzorce:

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot d_1 \cdot s_o \cdot \sigma_p \quad (3.18)$$

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 52,5 \cdot 2,5 \cdot 370 = 76\,281,8 \text{ N} \approx 76,3 \text{ kN}$$

Síla pro ohyb rovných stěn se stanoví:

$$F_o = 2 \cdot l_{hc} \cdot s_o \cdot \sigma_o \quad (3.19)$$



Obr. 47 Rozměry k výpočtu lemování [17]

Výpočet ohybového napětí na tažné hraně (2.7):

$$\sigma_o = \frac{\sigma_p \cdot s_0}{4 \cdot \left(r_{tc} + \frac{s_0}{2} \right)} = \frac{370 \cdot 2,5}{4 \cdot \left(3 + \frac{2,5}{2} \right)} = 54,4 \text{ MPa}$$

$$F_o = 2 \cdot 229 \cdot 2,5 \cdot 54,4 = 62\,288 \text{ N} \approx 62,3 \text{ kN}$$

Nyní lze již tažnou sílu při zvoleném opravném koeficientu $k_o = 1,15$:

$$F_{11} = (76,3 + 62,3) \cdot 1,15 = 159,4 \text{ kN}$$

Do celkové síly se započítává i síla od přidržovače (2.26):

$$F_1 = 159,4 + 61,3 = 220,7 \text{ kN}$$

Tažná síla pro první operaci musí splňovat podmínku (2.31) s kritickou silou na utržení dna výtažku:

$$F_{\text{krit}} = O_d \cdot s_0 \cdot R_m \quad (3.20)$$

kde: O_d – obvod dna [mm].

$$O_d = 2 \cdot l + \frac{\pi \cdot t}{2} = 2 \cdot 229 + \frac{\pi \cdot 50}{2} = 536,5 \text{ mm} \quad (3.21)$$

$$F_{\text{krit}} = 536,5 \cdot 2,5 \cdot 270 = 362\,137,5 \text{ N} = 362,1 \text{ kN}$$

Podmínka (2.31) je splněna, celková tvářecí síla o velikosti $F_1 = 220,7 \text{ kN}$ je menší než síla na utržení dna, což potvrzuje vyrobitelnost součásti v jedné tažené operaci.

Ve druhé operaci je nutné zhotovit technologické otvory. Vzhledem k jejím rozměrům budou zhotoveny najednou. Potřebná síla k jejich prostřížení se určí dle vztahu:

$$F_s = (1 \div 1,3) \cdot S \cdot 0,8 \cdot R_m \quad (3.22)$$

kde: S – plocha stříhu [mm²].

Pro určení střížné síly je třeba vypočíst plochu stříhu, která se určí dle následujícího vztahu:

$$S = 2 \cdot s_0 \cdot \pi \cdot d_{to} + (2 \cdot l_{1s} + 2 \cdot l_{2s} + \pi \cdot 2 \cdot r_r) \cdot s_0 \quad (3.24)$$

kde: l_{1s} – délky hran stříhaného otvoru [mm],

r_r – poloměr zaoblení rohu stříhaného otvoru [mm].

$$S = 2 \cdot 2,5 \cdot \pi \cdot 12,5 + (2 \cdot 30,6 + 2 \cdot 10,6 + \pi \cdot 2 \cdot 2,4) \cdot 2,5 = 421,2 \text{ mm}^2$$

Celková plocha střížné plochy teda je 421,2 mm². Nyní je možné určit střížnou sílu:

$$F_s = 1,2 \cdot 421,2 \cdot 0,8 \cdot 370 = 149\,610,5 \text{ N} = 149,6 \text{ kN}$$

K této síle je třeba připočítat sílu dvojice tlačných pružin 4,5x27x153x17,5, které byly navrženy pro přidržovač:

$$F_{\text{pr}} = R_{\text{pr}} \cdot \Delta_{\text{lp}} \quad (3.25)$$

kde: F_p – síla pružiny [N],

R_{pr} – tuhost pružiny [N · mm⁻¹],

Δ_{lp} – hodnota stlačení pružiny [mm].

$$F_{\text{pr}2} = 2 \cdot 20,57 \cdot 17,5 = 720 \text{ N} = 0,72 \text{ kN}$$

Celková síla pro druhou operaci je pak rovna součinu střížné síly a síly pro překonání pružin:

$$F_2 = F_s + F_{\text{pr}2} = 149,6 + 0,72 = 150,3 \text{ kN}$$

Ve třetí operaci se zhotoví lem. Tažná síla bude počítána, jakou součet síly pro ohyb rovných částí lemu a síly pro lemování kruhového otvoru, který nahradí rohy otvoru. Síla pro lemování rohu se určí vzorcem dle Tschätsche:

$$F_{\text{tl}} = 0,7 \cdot s_0 \cdot (d_{\text{oh}} - d_{\text{to}}) \cdot R_m \quad (3.26)$$

kde: d_{oh} – průměr otvoru v ohybnici [mm].

$$F_{\text{tl}} = 0,7 \cdot 2,5 \cdot (11 - 5,8) \cdot 370 = 3\,367 \text{ N}$$

Pro výpočet ohybové síly je třeba znát ohybové napětí:

$$\sigma_o = \frac{\sigma_p \cdot s_0}{4 \cdot \left(r_{tc} + \frac{s_0}{2} \right)} = \frac{370 \cdot 2,5}{4 \cdot \left(2 + \frac{2,5}{2} \right)} = 71,2 \text{ MPa}$$

Nyní lze spočítat sílu pro ohyb rovných částí lemu:

$$F_{ol} = 2 \cdot l_1 \cdot s_0 \cdot \sigma_o + 2 \cdot l_2 \cdot s_0 \cdot \sigma_o \quad (3.27)$$

kde: l_1, l_2 – délky lemovaných hran [mm].

$$F_{ol} = 2 \cdot 39 \cdot 2,5 \cdot 71,2 + 2 \cdot 19 \cdot 2,5 \cdot 71,2 = 20\,648 \text{ N}$$

Síla pro lemování je:

$$F_l = F_{t2} + F_{ol} = 3\,367 + 20\,648 = 24\,015 \text{ N} = 24 \text{ kN}$$

Je taky potřeba započítat sílu pružin přidržovače. Pro tento přidržovač byla zvolena tlačná pružina 6,3x29,2x155x14,5 od firmy HENNLICH s.r.o.:

$$F_{pr3} = 2 \cdot 87,07 \cdot 18 = 3\,134,5 \text{ N} = 1,2 \text{ kN}$$

Celková síla třetí operace:

$$F_3 = F_l + F_{pr3} = 24 + 1,2 = 25,2 \text{ kN}$$

Síla pro třetí operaci byla stanovena na 25,2 kN.

Síla čtvrté operace je určena se zjednodušením ze sférického tvaru s dvojitým zaoblením na tvar válcového výtažku s maximální silou tažení. Tuto sílu lze určit dle následujícího vztahu:

$$F_{t4} = \pi \cdot d_i \cdot s_0 \cdot k_d \quad (3.28)$$

kde: k_d – tažný odpor [MPa].

Tažný odpor lze vyjádřit tímto vzorcem:

$$k_d = [(\sigma_1 + \sigma_t) \cdot (1 + 1,6 \cdot f) + \sigma_o] \cdot \sin \alpha \quad (3.29)$$

Pro výpočet tažného odporu je nutné znát podélné tahové napětí:

$$\sigma_1 = k \cdot \left(\frac{1}{m_1} \cdot k' \right) \cdot \sigma_p \quad (3.30)$$

kde: k, k' - koeficient charakterizující zpevnění tažného kovu při tažení v závislosti na velikosti poměrného prodloužení [-].

$$\sigma_1 = 0,85 \cdot \left(\frac{1}{0,8} \cdot 1,1 \right) \cdot 370 = 47,2 \text{ MPa}$$

$$k_d = [(47,2 + 0) \cdot (1 + 1,6 \cdot 0,15) + 0] \cdot \sin 90 = 58,6 \text{ MPa}$$

$$F_{t4} = \pi \cdot 50 \cdot 2,5 \cdot 58,6 = 23\,012 \text{ N}$$

Tuto tažnou sílu je nutné vyvinout přes klínový mechanismus, a proto je tedy nutné vypočítat sílu, kterou vyvine lis:

$$F_{t4l} = \frac{F_{t4}}{\operatorname{tg}(\beta - \delta) - f} \quad (3.31)$$

kde: β – úhel klínu [°],

δ – třecí úhel [°].

Třecí úhel lze určit ze vztahu:

$$f = \operatorname{tg}(\delta) \quad (3.32)$$

$$F_{t4l} = \frac{23\,012}{\operatorname{tg}(45 - 8,53) - 0,15} = 39\,059 \text{ N}$$

K této síle je potřeba připočítat síly na překonání odporu pružin pomocného mechanismu. Tlačná pružina 4,5x40,5x53x3,3 od firmy HENNLICH s.r.o. byla zvolena k přidržení systému uchycení tažníku. Síla k překonání jejího odporu se vypočítá:

$$F_{pr4} = 26,63 \cdot 10 = 266,3 \text{ N}$$

Dále je třeba započítat i pružinu, která slouží k vytažení tažníku ze součásti. Tato pružina musí být poměrně silná, protože při nevytažení tažníku ze součásti při pohybu lisu nahoru by mohlo dojít k poškození tažníku, tažnice a možná taky i celého nástroje. Proto byla vybrána pružina 6,3x31,1x49x3,5 od firmy HENNLICH s.r.o., která s je tuhostí $R = 284,01 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ nejsilnější s ohledem na rozměrové možnosti pružiny. Síla této pružiny se určí dle (3.25):

$$F_{pr5} = 284,01 \cdot 10 = 2840,1 \text{ N}$$

Tato síla by měla být dostatečná k vrácení tažníku do výchozí polohy a tím i k zaručení bezpečnosti nástroje.

Celková síla čtvrté operace se potom určí součtem tažné síly a sil k překonání pružin:

$$F_4 = F_{t41} + F_{pr4} + F_{pr5} = 39\,059 + 266,3 + 2840,1 = 42\,125,4 \text{ N} = 42,2 \text{ kN}$$

Síla potřebná ke čtvrté operaci je 42,2 kN.

Celková síla pro jeden zdvih nástroje se pak určí součtem sil v jednotlivých operacích:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$

$$F = 220,7 + 150,3 + 25,2 + 42,2 = 438,4 \text{ kN}$$

(3.33)

Síla pro jeden zdvih nástroje $F = 438,4 \text{ kN}$.

Dalším důležitým parametrem pro volbu stroje je znalost práce. Práce pro první operaci lze určit dle vztahu (2.33), kde koeficient plnosti diagramu byl zvolen $\psi = 0,7$:

$$A_1 = \frac{F_c \cdot h \cdot \psi}{1000} = \frac{245300 \cdot 50 \cdot 0,7}{1000} = 8\,585,5 \text{ J} \approx 8,6 \text{ kJ}$$

Práce první operace byla spočítána na 8,6 kJ.

Práce střižné síly se určí následovně:

$$A = \frac{k \cdot F_s \cdot s_0}{1000}$$

(3.34)

kde: k – koeficient závislý na druhu a tloušťce materiálu, dle tab. 11 [-].

$$A_2 = \frac{0,55 \cdot 150\,300 \cdot 2,5}{1000} = 206,7 \text{ J} = 0,21 \text{ kJ}$$

Práce střižné síly ve druhé operaci byla stanovena na 0,21 kJ.

Tab. 11 Hodnoty koeficientu k [17]

Materiál	Tloušťka materiálu [mm]			
	do 1	1 ÷ 2	2 ÷ 4	nad 4
Ocel měkká	0,70 – 0,65	0,65 – 0,60	0,60 – 0,50	0,45 – 0,35
Ocel středně tvrdá	0,60 – 0,55	0,55 – 0,50	0,50 – 0,42	0,40 – 0,40
Ocel tvrdá	0,45 – 0,42	0,42 – 0,38	0,38 – 0,33	0,30 – 0,20

Práce lemovací síly lze určit dle následujícího vzorce:

$$A = \frac{k_1 \cdot F \cdot h}{1000}$$

(3.35)

kde: k_1 – koeficient respektující průběh lemovací síly, všeobecně $k = 1/3$ [-].

$$A_3 = \frac{1 \cdot 25\,200 \cdot 8}{3 \cdot 1000} = 67,2 \text{ J} = 0,07 \text{ kJ}$$

Práce třetí operace:

$$A_4 = \frac{42\,200 \cdot 10 \cdot 0,7}{1000} = 295,4 \text{ J} \approx 0,3 \text{ kJ}$$

Práce třetí operace byla vypočítána na 0,3 kJ.

Celková práce:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 8,6 + 0,21 + 0,07 + 0,3 = 9,18 \text{ kJ}$$

Celková vykonaná práce je tedy 9,18 kJ.

3.6 Volba stroje [21]

Volba vhodného stroje závisí především na vypočítané celkové tvářecí síle a práci. Vypočítané hodnoty nejsou však nijak velké, a proto tyto požadavky splňuje většina tvářecích lisů. Dalším důležitým faktorem pro volbu je zdvih stroje společně s velikostí upínacího prostoru. Pro výrobu krytu tažného kloubu bude použit sdužený nástroj pro čtyři operace. Proto bude zásadním parametrem pro volbu stroje velikost pracovního prostoru.

Vhodné hydraulické lisy různých typů pro tváření vyrábí například firma ŽDAS. Z nabízených lisů výše zmíněným požadavkům nejvíce vyhovuje řada univerzálních hydraulických lisů s označením CTH. Jedná se o lisy určené pro všechny běžné operace plošného i objemového tváření. Lisy jsou svislé konstrukce se svařovaným rámem uzavřené skříňové konstrukce. V horní příčnici je uložen dvojčinný pracovní válec s plnicím ventilem. Jejich výhodou je velká tuhost stojanu. Lisy lze doplnit dle požadavků o horní i spodní vyhazovač, zařízením pro automatickou výměnu nástrojů, upínkami a dalším zařízením. Další výhodou je možnost řídit tvářecí rychlost během tvářecího procesu v závislosti na dráze.

Pro výrobu zadané součásti byl zvolen lis CTH 250, jehož základní technické parametry jsou uvedeny v tabulce 12.



Obr. 48 Hydraulický lis CTH [21]

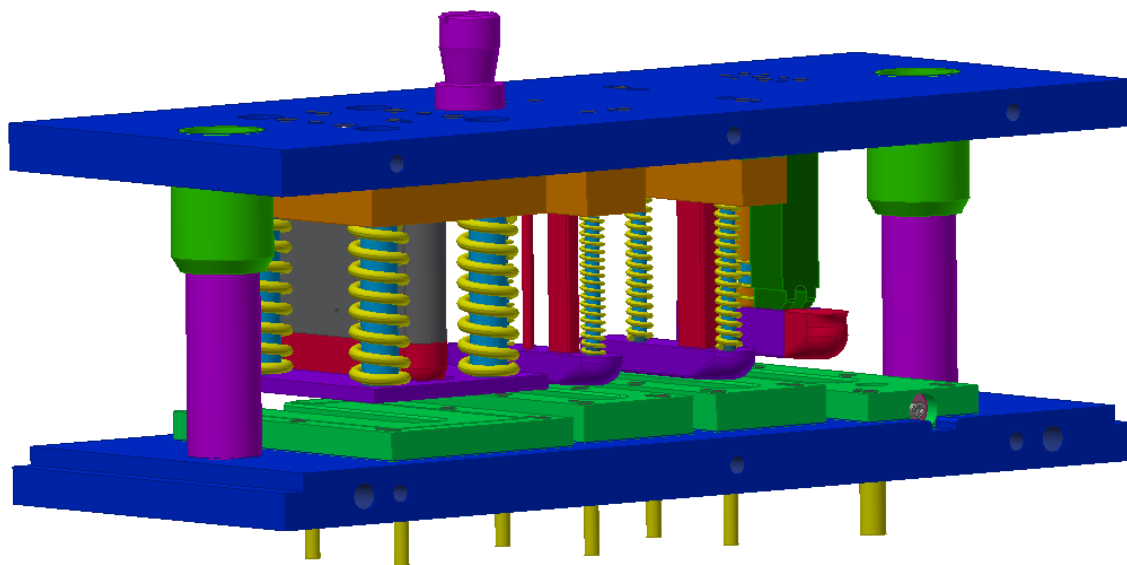
Tab. 12 Základní technické parametry lisu CTH 250 [21]

Jmenovitá síla	[kN]	2 500
Zpětná síla	[kN]	300
Sevřená výška	[mm]	800
Zdvih	[mm]	800
Pracovní rychlost min. – max.	[mm · s ⁻¹]	20 – 70
Upínací plocha stolu	[mm]	1 000 x 1 250
Upínací plocha beranu	[mm]	1000 x 1 250
Síla přidržovače	[kN]	1 000
Výkon hlavního motoru	[kW]	55

3.7 Návrh nástroje [33]

Nástroj je navrhnut dle předchozích výpočtů. Výroba krytu tažného kloubu je navržena ve čtyřech operacích. Zde připadá v úvahu, zda vyrobit čtyři malé nástroje pro jednotlivé operace nebo jeden sdružený nástroj. Při tomto rozhodnutí má zásadní vliv cena nástrojů. Dále neméně důležitý faktor je čas výroby. Při použití sdruženého nástroje probíhají všechny operace najednou, a tak je celá výroba výrazně rychlejší, což se odrazí i ve výsledné ceně součásti. Právě z časových důvodů byla zvolena varianta sdruženého nástroje.

Navržený nástroj je postupový a skládá se ze dvou tažných, jedné prostřihovací a jedné lemovací operace. Při návrhu bylo z větší části využíváno nenormalizovaných dílů, které se budou vyrábět na zakázku. Jedná se především o tvářecí nástroje a desky. Tyto součásti nástroje lze vyrábět z předem připravených polotovarů, které jsou nabízené různými firmami.



Obr. 49 Nástroj v otevřeném stavu

K výrobě lze také použít hutní materiály, jejichž nákupní cena je výrazně nižší. Na kvalitu nemá vliv žádná z možností za předpokladu dodržení předepsaných materiálů a tepelného zpracování. Z normalizovaných dílů je především spojovací materiál, stopka a pružiny. Konstrukce nástroje je znázorněna na obrázku 49.

Pro správnou funkci a bezproblémový provoz nástroje je důležité správné umístění stopky. Ta by měla být v ideálním případě umístěna v těžišti sil, které lze určit následujícím výpočtem:

$$\sum_{i=1}^n F_i \cdot l_i = F_c \cdot l \quad (3.36)$$

Pak pro těžiště ve směru 'x' je následující výpočet:

$$l_x = \frac{\frac{F_{p1}}{2} \cdot l_{1xp1} + F_{t1} \cdot l_{1x} + \frac{F_{p1}}{2} \cdot l_{1xp2} + F_2 \cdot l_{2x} + F_3 \cdot l_{3x} + F_4 \cdot l_{4x}}{F_c}$$

$$l_x = \frac{30,65 \cdot 235 + 159,4 \cdot 310 + 30,65 \cdot 285 + 150,3 \cdot 543 + 25,2 \cdot 726 + 42,2 \cdot 1}{438,4}$$

$$l_x = 464,6 \text{ mm}$$

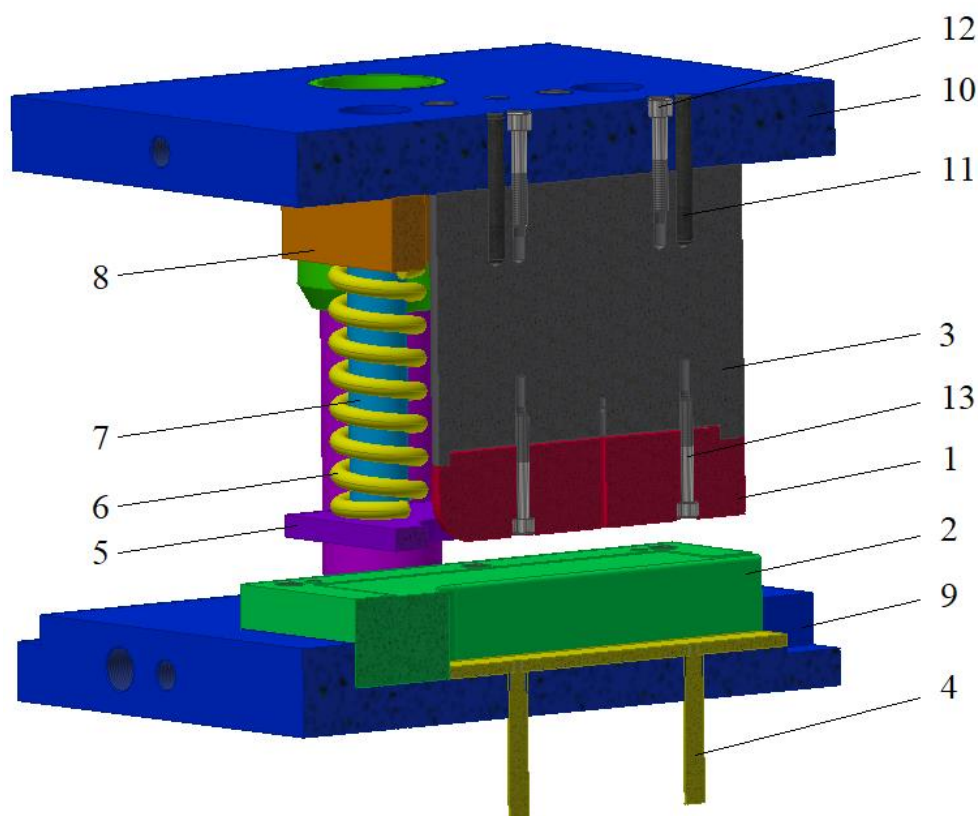
Obdobným způsobem se určí i těžiště ve směru 'y':

$$l_y = \frac{\frac{F_{p1}}{2} \cdot (l_{yp1} + l_{yp2}) + F_{t1} \cdot l_{1y} + F_s \cdot l_{2y} + \frac{F_{pr2}}{2} \cdot (l_{2y1} + l_{2y2}) + F_1 \cdot l_{3y} + F_4 \cdot l_{4y} + \frac{F_{pr3}}{2} \cdot (l_{3y1} + l_{3y2})}{F_c}$$

$$l_y = \frac{30,65 \cdot (135 + 308) + 159,4 \cdot 210 + 149,6 \cdot 197,3 + 0,36 \cdot (162,5 + 316,5) + 24 \cdot 271,5}{438,4} + \frac{0,6 \cdot (171,5 + 321,5) + 42,2 \cdot 191,5}{438,4} = 209,0 \text{ mm}$$

Poloha těžiště sil, a tedy i poloha stopky vyšla dle předpokladu do prostoru mezi první a druhou operací, kde jsou největší síly. V tomto prostoru desky nejsou umístěny žádné prvky, které by bránily umístění stopky přímo do ideální polohy.

První operací (obr. 50) je tažení, kdy se z plechu vytváří základní tvar krytu. Plechový přístřih se zakládá do přesného vybrání v tažnici (2), která je spojena se základní deskou (9) šrouby a kolíky. Při pohybu beranu lisu směrem k dolní úvratí, dochází ke kontaktu přidržovače (5) a polotovaru. Tlak přidržovače na plech je vyvíjen pomocí tlačné pružiny 12x66x173x7 (6), která zajistí dostatečný tlak přidržovače.



Obr. 50 První operace

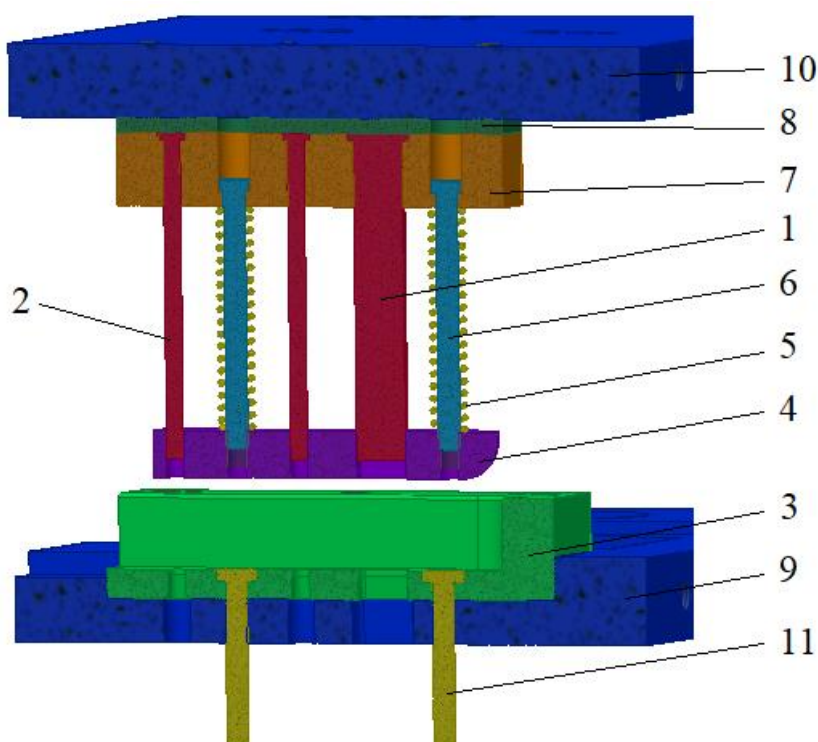
Pružina byla navrhnutá v závislosti na požadovaném tlaku přidržovače:

$$F_{pr1} = \frac{F_p}{4} \tag{3.37}$$

$$F_{pr1} = \frac{75,2}{4} = 18,8 \text{ kN}$$

Pružina je umístěna na vodícím čepu (7), který je vložen upínací desce přidržovače (8). Její spojení s upínací deskou nástroje (10) zajišťují kolíky a šrouby. Při pokračování v plynulém pohybu dolů začíná tažník (1) tvářet plechový přístřih. Tažník je dělené konstrukce, kvůli úspoře nástrojové oceli. Tělo tažníku (3) je s tvářecí částí spojeno šroubem M10x70 (13). celý tažník je upevněn k upínací desce nástroje šrouby M12x65 (12) a kolíkem 12x100 (11). Po dokončení tažení je výtažek z tažnice vyhozen vyhazovačem (4) a vyjmut z tažnice směrem do boku, kde je tažnice otevřená právě kvůli snadnému vybrání výtažku.

Ve druhé operaci se prostřihují otvory, které nemohly být zhotoveny zároveň při řezání polotovaru. Jedná se především o hranatý otvor, který je velmi blízko oválnému kraji, a proto by během první operace došlo k jeho deformaci, jak je znázorněno na obrázku v příloze 1. Na obrázku 51 zobrazen řez nástrojem pro tuto operaci. Výtažek z první operace se z boku zasune do otevřené střižnice (9), která je v základové desce upevněna pomocí šroubů a kolíků. Při pohybu beranu lisu dolů je výtažek přichycen přidržovačem (4). Ten díky své tvarové části, která je shodná s tvarem tažníku z první operace, přesně srovná a přidrží vložený výtažek pro následné prostřížení. Tlak přidržovače je opět zajištěn použitím pružin (5), jež jsou navlečeny na čepch (6). Konstrukce přidržovače je upevněna v kotevní desce (7), ve které jsou rovněž vloženy dva střižníky (2) pro kruhový otvor a jeden střižník (1) pro hranatý otvor. Nad kotevní deskou je deska opěrná (8), která brání otlacení upínací desce (10) nástroje. Po prostřížení odpad propadá střižnicí a základovou deskou (9) dolů. V případě, že by výtažek zůstal ve střižnici, je operace vybavena vyhazovačem (11) pro snadné vybrání z boku střižnice. Naopak pokud by výtažek zůstal na střižnicích, tak dojde k jeho setření o přidržovač.



Obr. 51 Druhá operace

Při prostřihování je důležité správně určit funkční rozměry střižných nástrojů, které lze určit dle ČSN 22 6015. V tabulce 13 jsou vybrané hodnoty pro jejich výpočet.

Tab. 13 Hodnoty pro výpočet funkčních rozměrů střížných nástrojů [37]

Jmenovitý rozměr 'JR'	Míra opotřebení 'P'	Výrobní tolerance	
		Střížník 'TA'	Střížnice 'TE'
12,5 ± 0,2	0,310	0,074	0,120
15,4 ± 0,2	0,310	0,074	0,120
35,4 ± 0,3	0,460	0,120	0,190
2,4 ± 0,1	0,160	0,035	0,054

Rozměr střížníku při děrování se určí dle vztahu:

$$RAD = \left(JR + \frac{P}{2} \right) - TA \quad (3.38)$$

kde: RAD – rozměr střížníku [mm],
 JR – jmenovitý rozměr [mm],
 P – přípustná míra opotřebení [-],
 TA – výrobní tolerance střížníku [mm].

Pro určení rozměrů střížnice při děrování se pak použije následující vztah:

$$RED = \left(JR + \frac{P}{2} + V \right) + TE \quad (3.39)$$

kde: RED – rozměr střížnice při děrování [mm],
 V – střížná vůle [mm],
 TE – výrobní tolerance střížnice [mm].

Vzorový výpočet je proveden pro rozměr 12,5 ± 0,2 mm:

$$RAD = \left(12,5 + \frac{0,310}{2} \right) - 0,074 = 12,655_{-0,074}^0 \text{ mm}$$

$$RED = \left(12,5 + \frac{0,310}{2} + 0,3 \right) + 0,120 = 12,955_0^{+0,120} \text{ mm}$$

Hodnoty všech funkčních rozměrů jsou uvedeny v tabulce 14.

Tab. 14 Funkční rozměry střížných nástrojů

Jmenovitý rozměr	RAD	RED
12,5 ± 0,2	12,655 _{-0,074} ⁰	12,955 ₀ ^{+0,120}
15,4 ± 0,2	15,155 _{-0,074} ⁰	15,855 ₀ ^{+0,120}
35,4 ± 0,3	35,63 _{-0,120} ⁰	35,93 ₀ ^{+0,120}
2,4 ± 0,1	2,48 _{-0,035} ⁰	2,78 ₀ ^{+0,054}

Pro tuto část nástroje je potřeba provést kontrolu střížníků na vzpěrnou stabilitu. Při kontrole se počítá kritická délka nástroje, po jejímž překročení hrozí ztráta vzpěrné stability a vyhnutí nástroje. V navrženém nástroji jsou střížníky uchyceny v kotevní desce, což lze pro výpočet považovat za vetknuté uložení. Druhý konec je veden skrz přidržovač, tedy posuvná vazba. Z těchto důvodů bude vzpěrná délka 'L_v' uvažována L_v = 0,75 · l_s.

Vychází se ze vztahu pro kritickou sílu:

$$F_{\text{krit}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_s}{L_v^2} \quad (3.40)$$

kde: E – Youngův modul pružnosti v tahu [MPa],
 J_s – osový moment setrvačnosti [mm⁴].

Osový moment kruhových součástí lze spočítat:

$$J_s = \frac{\pi \cdot d_{\text{st}}^4}{64} = \frac{\pi \cdot 12,5^4}{64} = 1\,198,4 \text{ mm}^4 \quad (3.41)$$

kde: d_{st} – průměr střižníku [mm].

Výpočet kritické délky je vyjádřen pomocí (3.39) následovně:

$$l_{s1\text{krit}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_s}{F_{s1}} \cdot \frac{4}{3}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1\,198,4}{34\,809} \cdot \frac{4}{3}} = 356,2 \text{ mm}$$

Kritická délka střižníku pro kruhový otvor je 356,2 mm. Jeho volná délka při stříhu je však je 153 mm. T toho plyne, že nedojde ke ztrátě vzpěrné stability a střižník je vyhovující.

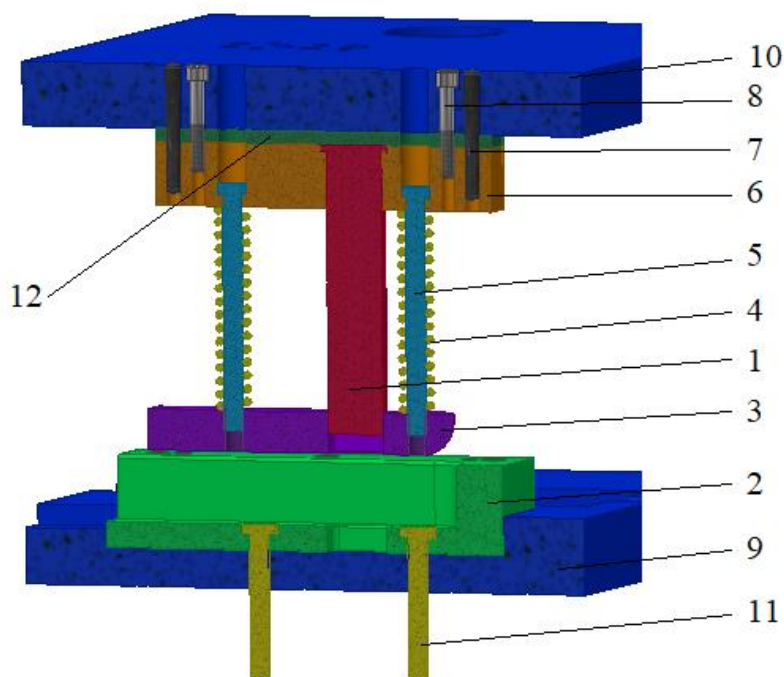
Je třeba také ověřit vzpěrnou stabilitu hranatého střižníku. Osový moment pro hranaté součásti se spočítá:

$$J_s = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{35,4 \cdot 15,4^3}{12} = 10\,774,2 \text{ mm}^4 \quad (3.42)$$

Kritické délka se pak určí následovně:

$$l_{s2\text{krit}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_s}{F_{s2}} \cdot \frac{4}{3}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 10\,774,2}{79\,992} \cdot \frac{4}{3}} = 704,5 \text{ mm}$$

Kritická délka hranatého střižníku byla spočítána na 704,5 mm což je násobně více než jeho volná délka. Proto je i tento střižník vyhovující.

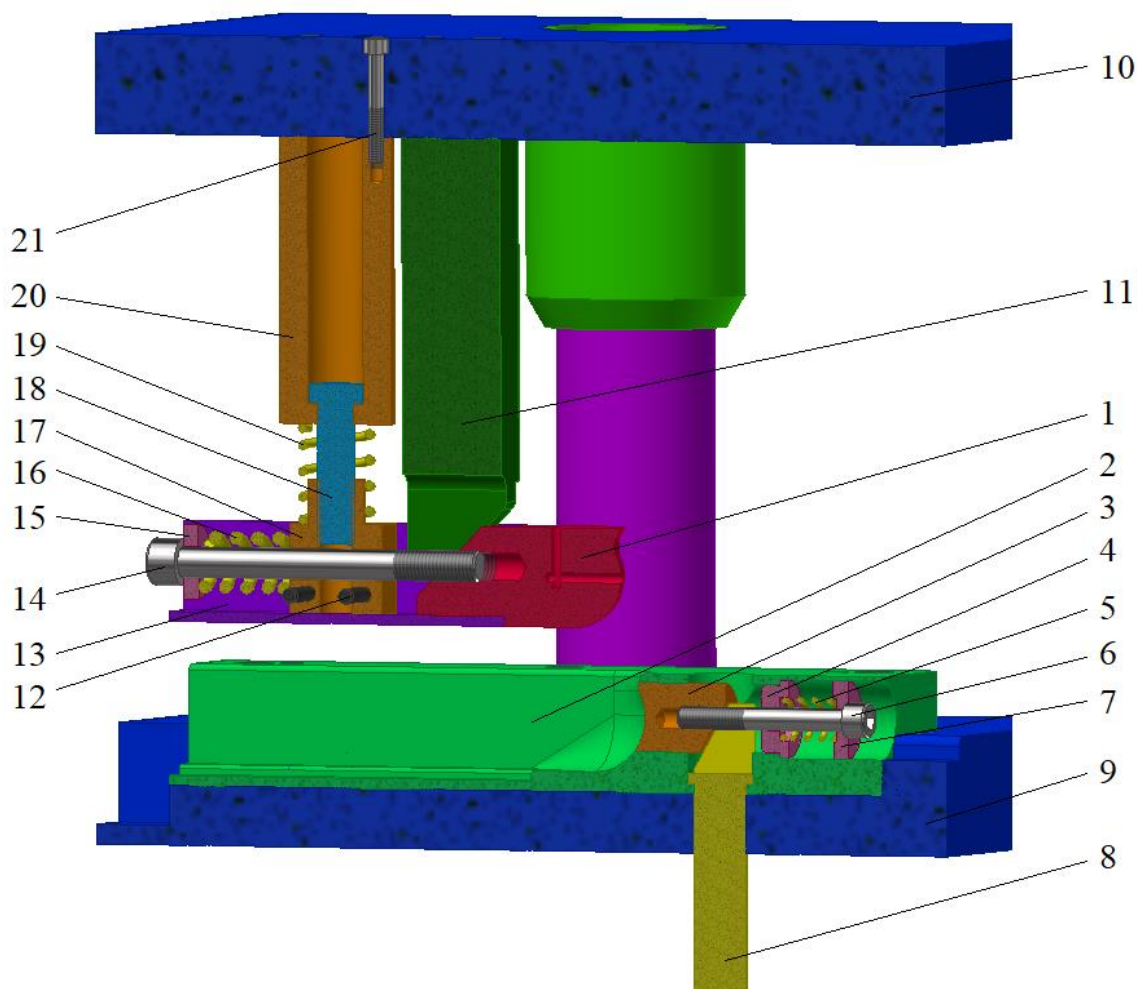


Obr. 52 Třetí operace

Ve třetí operaci (obr. 52) se zhotovuje lem hranatého otvoru. Do lisovnice (2) vložený výtažek se přichytí pružinovým přidržovačem (3) a lisovník (1) vytvoří lem rozšířením otvoru. Uchycení lisovnice, konstrukce přidržovače, lisovníku a opěrné desky (12) je totožné, jako ve druhé operaci. Pro snadné vložení i vyjmutí výtažku po lemování z nástroje je použita otevřená lisovnice.

V této operaci není potřeba provádět kontrolu na vzpěr lisovníku, protože síla působící na nástroj je menší než síla působící na hranatý střížník, přičemž rozměry střížníku jsou podstatně menší než rozměry lisovníku. Proto se dá předpokládat, že lisovník neztratí vzpěrnou stabilitu a pro danou operaci bude vyhovující.

V poslední operaci, která je vyobrazena na obrázku 53 s zhotovuje vypouklá část se vzájemným přechodem zaoblení. Je opět použita otevřená tažnice (2) pro dobré vložení výtažku. Na její spodní straně je udělána drážka pro lem z předchozí operace. Konec této drážky slouží zároveň jako doraz. Při pohybu beranu lisu dolů, dojde ke kontaktu pouzdra nástroje (13), které zároveň jako opora pro již hotovou část vyráběné součásti a zabraňuje tak jejímu zborcení. Pouzdro je uchyceno k vodící kostce (17) pomocí kolíků (12). Kostku prochází šroub M16 x 160 (14), který drží tažník (1). Dále je na konci šroubu navlečena podložka (15) a o ni opřená tlačná pružina (16). Na šikmou plochu tažníku dosedá klín (11), jež je spojený s upínací deskou (10). Po dosednutí pouzdra nástroje (13) na povrch výtažku umožňuje tento mechanismus horizontální pohyb tažníku směrem do tvářeného materiálu.



Obr. 53 Čtvrtá operace

Naopak při začátku pohybu beranu z dolní úvratě do horní zajišťuje tento mechanismus díky velmi silné pružině i pohyb tažníku ven z výtažku. Celá tato konstrukce je připevněna pomocí čepu (18) a pružiny (19) ke kotevnímu pouzdru (20) a tím k upínací desce nástroje.

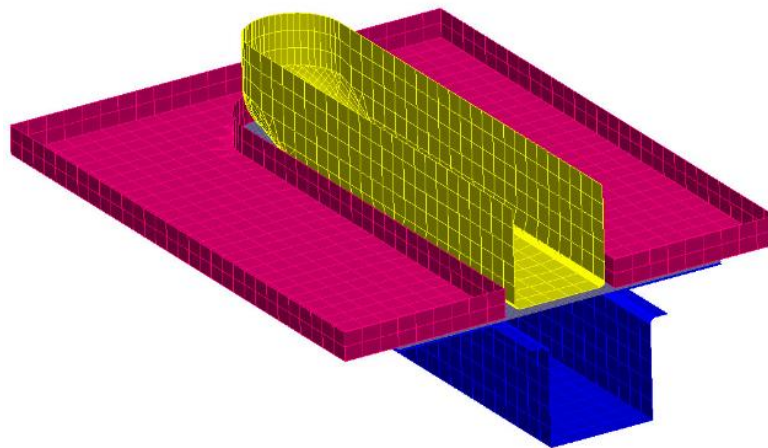
System vyhazovače je zabudovaný v tažnici (2). Jedná se o vyhazovač s klínovým mechanismem z důvodu vyráběného tvaru a nemožnosti vertikálního vyhození výtažku. Válcový vyhazovač s tvarovou částí (3) je ovládaný klínem (8) na šikmé ploše. Ve vyhazovači je našroubovaný šroub M12 x 90 (6) s podložkou (7) a pružinou (5), díky které se vyhazovač vrací na původní pozici. Pro lepší vedení šroubu je v otvoru tažnice zalisována vodící vložka. Protáčení vyhazovače brání vzájemný kontakt s plochou klínu a vypadnutím do tažnice brání šroub s podložkou a pružinou.

3.8 Simulace výroby [30], [44]

Pro ověření navržené technologie před zhotovením nástroje je vhodné provést simulaci výrobního procesu, která pomáhá eliminovat chyby a nedostatky. Pro kontrolu výroby krytu tažného kloubu byl použit program PAM-STAMP.

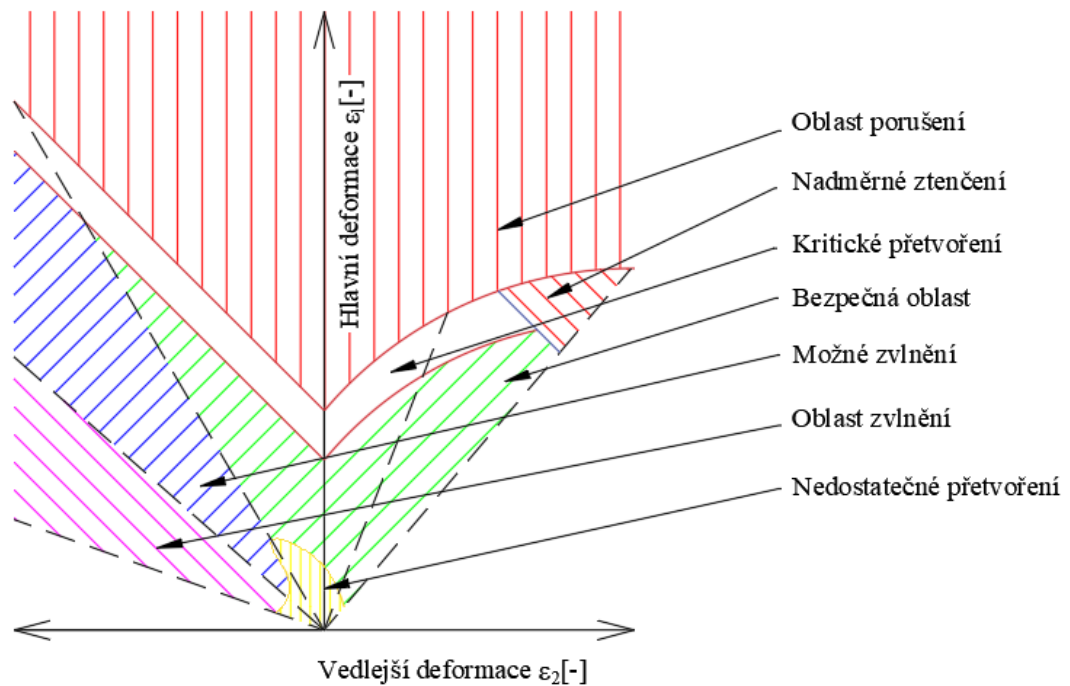
K dosažení dobrých výsledků je třeba zvolit správný materiálový model. Pro daný případ bylo využito materiálového modelu, který byl vybrán z databáze softwaru.

Geometrické modely pro simulaci byly vytvořeny pomocí CAD systému. Jedná se o model, kdy je celá sestava rozdělena na jednotlivé skořepinové (shell) prvky. Model pro první operaci je znázorněn na obrázku 54. Tyto modely se chovají jako plošné s přiřazenou tloušťkou. Nástroje v sestavě byly zadány jako ideálně tuhé.



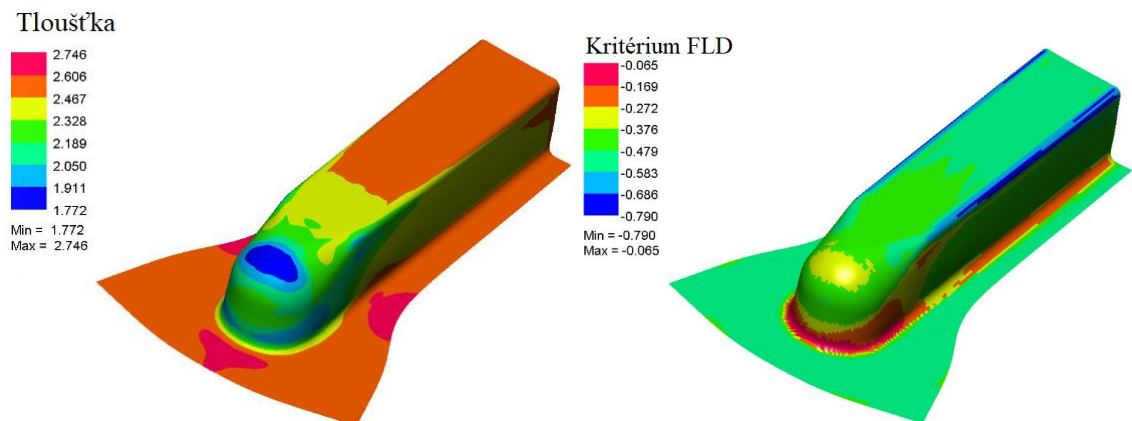
Obr. 54 Geometrický model první operace

Důležitým výstupním parametrem je dosažené přetvoření. Tyto hodnoty jsou zanášeny to diagramů mezní tvařitelnosti (FLD), ze kterých jsou následně vyhodnocovány. Nejznámější je Keeler-Goodwinův diagram jež je znázorněn na obrázku 55. Na vertikální ose jsou naneseny hodnoty hlavních logaritmických přetvoření a na horizontální ose pak vedlejší logaritmické deformace, jež jsou kolmé k hlavnímu přetvoření. Vyznačené křivky mezní tvařitelnosti představují limitní hodnoty a dělí diagram na oblast bezpečných přetvoření a oblast kritických přetvoření. Simulace zaznamenává hodnoty jednotlivých přetvoření a výstupem je diagram mezní tvařitelnosti se zaznačenými daty. Z tohoto diagramu pak můžeme kromě plastické stability taky určit defekty, jako je například zvlnění nebo ztenčení, které je taky velmi důležité.



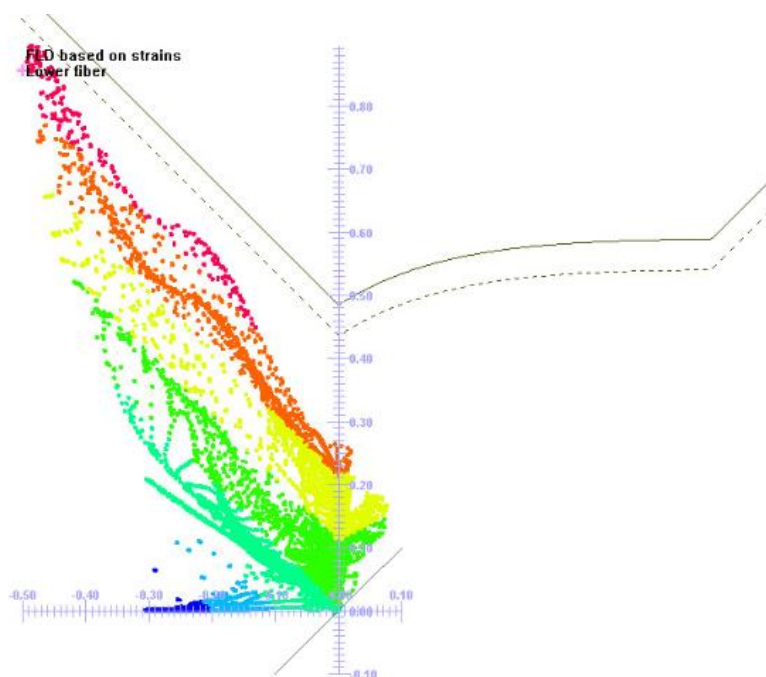
Obr. 55 Schématické znázornění K-G diagramu mezní tvařitelnosti [44]

Simulace byla provedena celkem v pěti operacích, z nichž první operací je tažení.



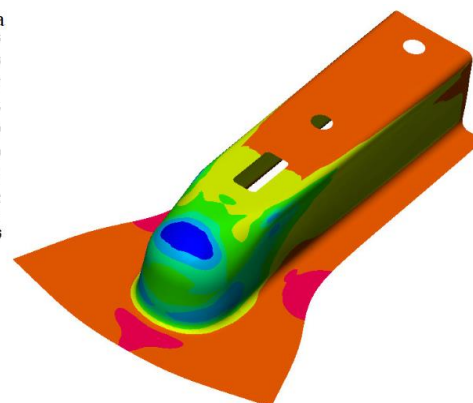
Obr. 56 První operace - tažení

Na obrázku 56 je vidět, že na vrchu kulové plochy dochází k výraznějšímu ztenčení plechu. V pravé části obrázku 56 je znázorněno kritérium FLD. Záporné hodnoty kritéria jsou umístěny v bezpečné oblasti diagramu. Kladné hodnoty jsou potom v oblasti porušení FLD. Hraniční hodnotou oblastí je nula. Největší kritérium FLD je na přechodu výtažku do příruby. Nejvyšších hodnot je dosaženo v oblasti válcové plochy, které se podle FLD diagramu blíží hranici kritické oblasti.



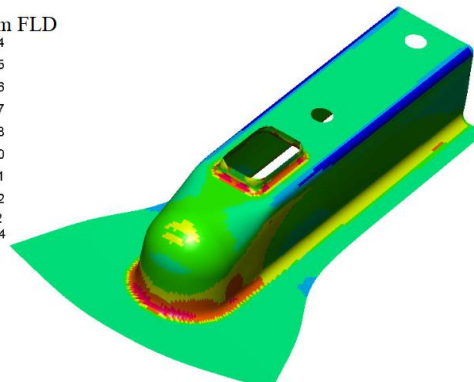
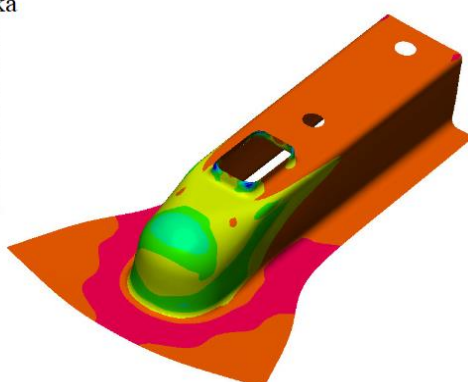
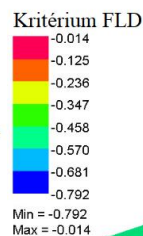
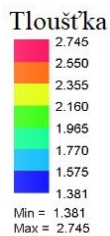
Obr. 57 FLD první operace

Ve druhé operaci se zhotovují vrchní hranatý otvor, který se bude následně lemovat a dva kruhové otvory. prostřížením, jak je patrné z obrázku 58. Tloušťka plechu po prostřížení zůstává nezměněná.

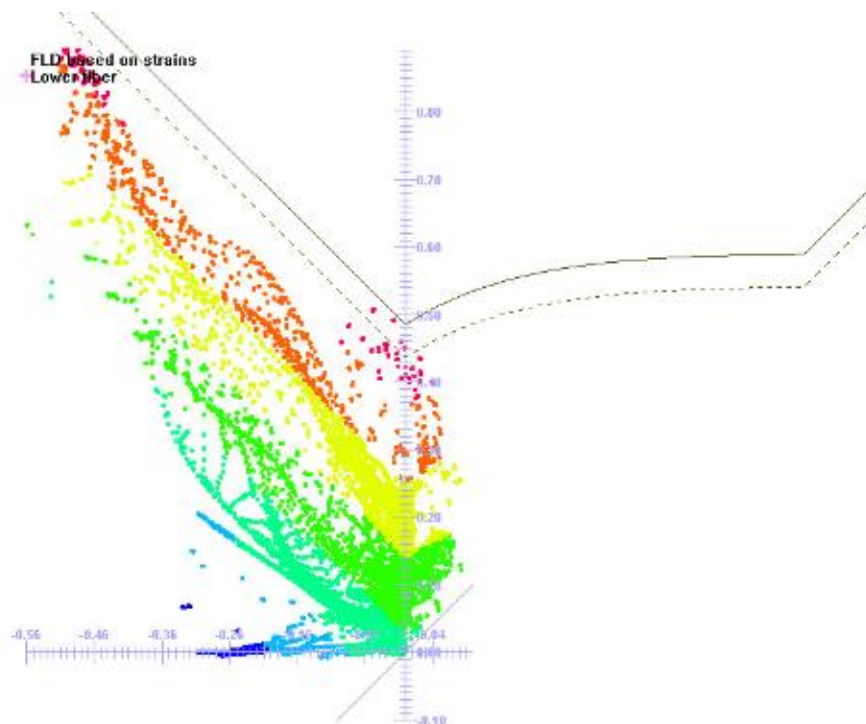


Obr. 58 Druhá operace - stříhání

Ve třetí operaci se vyrábí lem hranatého otvoru. Z obrázku 59 je patrné, že největších hodnot kritéria FLD při lemování je dosaženo v místě ohybu materiálu. Maximální hodnoty se blíží ke kritické oblasti a některé body již této oblasti dosáhly, jak lze vidět v FLD diagramu na obrázku 60. Ve stěnách lemu dochází ke ztenčení a maximálních hodnot je dosaženo v rozích lemu.

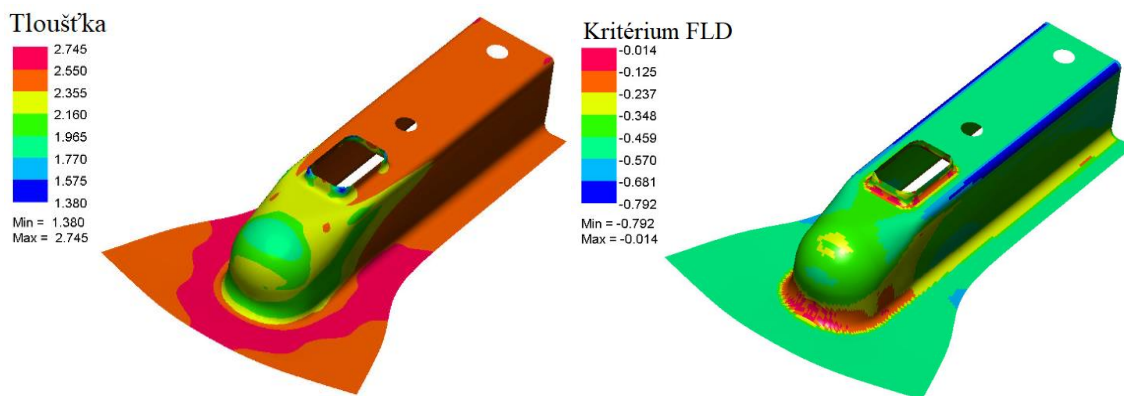


Obr. 59 Třetí operace - lemování

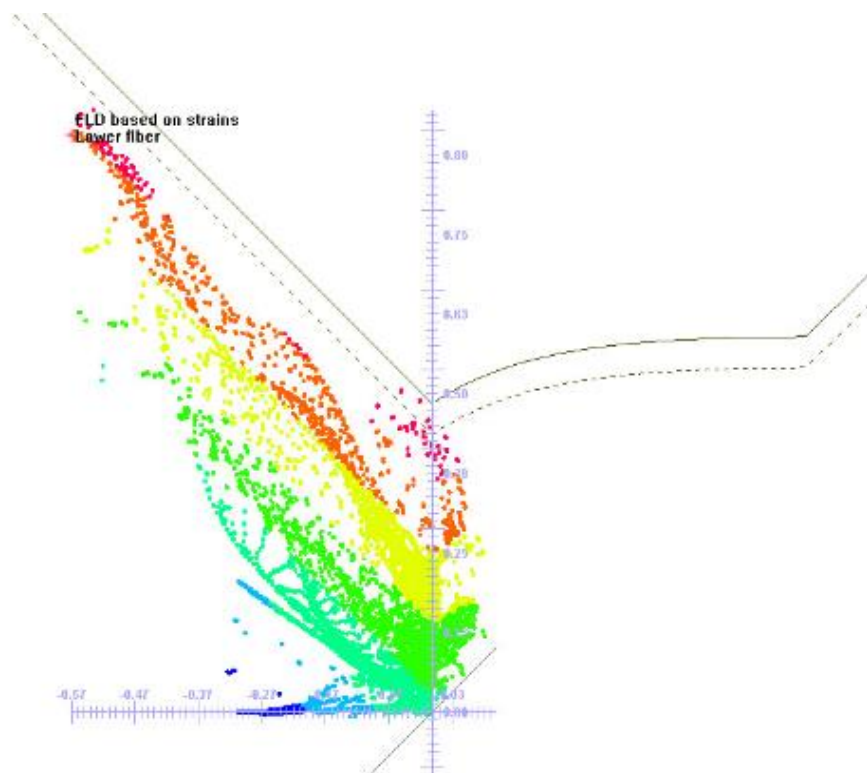


Obr. 60 FLD třetí operace

Ve čtvrté operaci se zhotovuje vypouklá část součásti (obr. 40). K maximálním hodnotám kritéria dochází v oblasti přechodu sférické plochy do příruby. Tyto hodnoty jsou opět na hranici s kritickou oblastí. Tloušťka se při této operaci mění pouze minimálně.

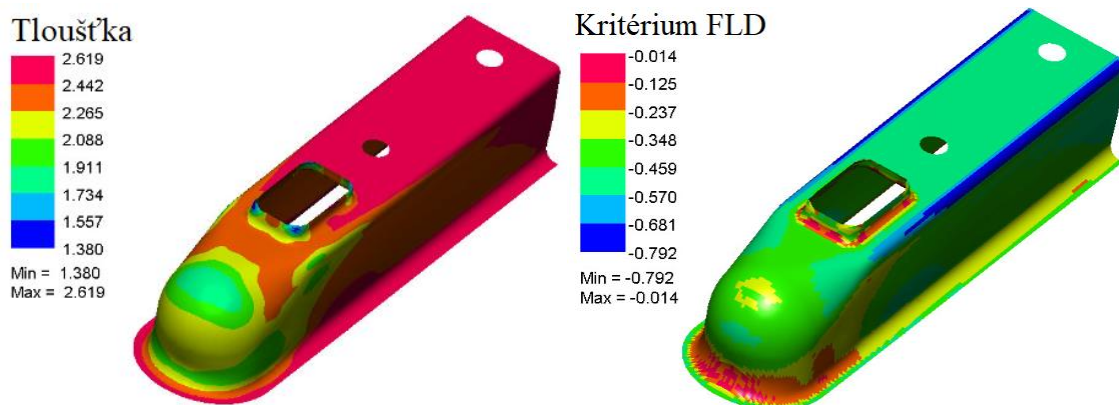


Obr. 61 Čtvrtá operace - tažení



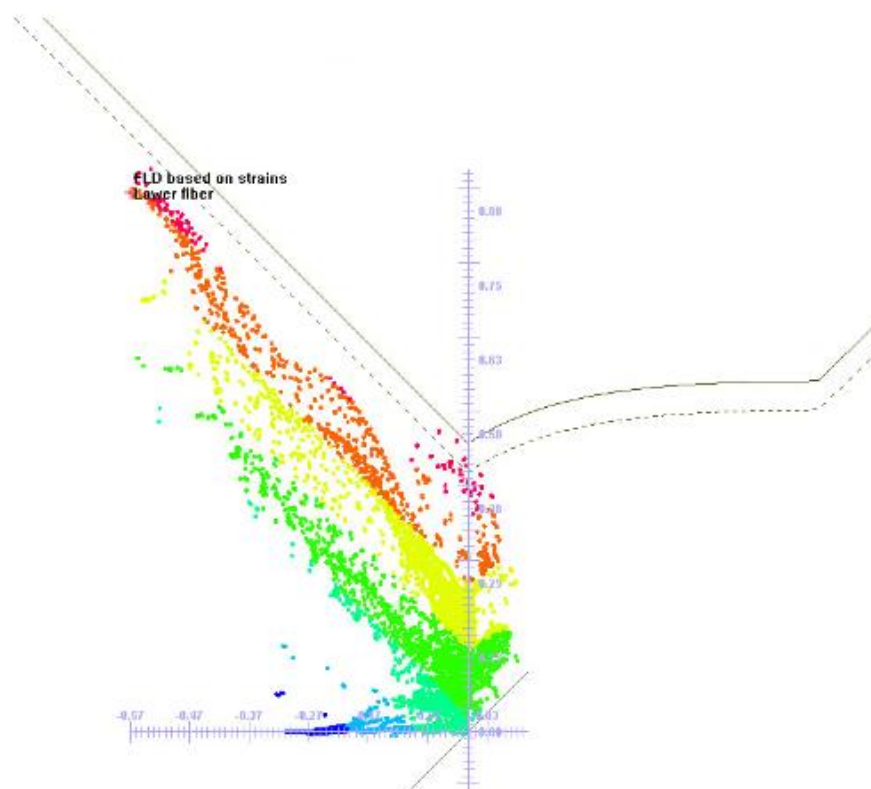
Obr. 62 FLD čtvrtá operace

V poslední páté operaci se provádí ostřížení příruby.



Obr. 63 Pátá operace - ostřížení

Na obrázku 63 můžeme vidět vizualizaci konečné tloušťky výtažku kdy minimální hodnota 1,38 mm je v ohybu lemu. Maximální tloušťka stěny je pak v hranaté části výtažku a její hodnota je 2,62 mm. Dále jsou patrné hodnoty kritéria. Ty se blíží kritické oblasti, ale dle FLD až na výjimečné případy do ní nezasahují.



Obr. 64 FLD pátá operace

Z celého průběhu simulace dochází k největším hodnotám FLD při lemování. Operace tažení jsou všemi body v bezpečné oblasti, ovšem velmi blízko kritické oblasti. Dále lze z diagramu vyčíst možnost zvlnění což lze eliminovat větším přidržovacím tlakem.

4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ HODNOCENÍ [38], [39], [40], [41]

Z technologického hlediska je výroba plošným tvářením na postupovém nástroji vhodná pro velkosériovou výrobu, protože se jedná o technologii s vysokou produktivitou práce. Další výhodou plošného tvářením za studena je vysoká přesnost rozměrů a kvalita povrchu. Zvolená výrobní technologie má také vliv na mechanické vlastnosti součástí. Tvářením za studena dochází ke zpevňování materiálu, které se zachová. To má za následek zlepšení mechanických vlastností, jako jsou mez pevnosti a mez kluzu. Použitím této technologie je dosaženo veškerých požadavků na zadanou součást. Nástroj, který má čtyři operace, plně vyhovuje všem požadavkům.

Ekonomické hodnocení výroby bude zpracováno pouze pro tvářením navržené technologie výroby krytu tažného kloubu, z důvodu chybějících informací o ostatních dílech tažného kloubu. Dále nebudou započteny náklady na kompletaci dílce. Pro neznalost ceny stroje CTH 250 je předpokládáno, že stroj je již zaplacen a odepsán. Mezi další nezapočítané náklady patří vytápění haly, osvětlení, doprava, platy administrativních pracovníků a jiné pohledávky jejichž výši nelze odhadnout.

Výrobní série je zadána na 50 000 kusů. Při výrobě je nutné počítat se zmetkovitostí, která provází každou výrobu. Proto bude uvažována zmetkovitost 1,5 % z celé výrobní série.

Náklady na materiál – k výrobě polotovaru byly zvoleny tabule plechu o velikosti 3 000 x 1 500 mm tloušťky 2,5 mm, ze které se vyrobí 80 kusů polotovarů. Cena tabule o hmotnosti $m_t = 89$ kg je 2 178 Kč bez DPH. Počet potřebných kusů tabulí se stanoví následovně:

$$n_t = \frac{v_s \cdot 1,015}{n_{ks}} = \frac{50\,000 \cdot 1,015}{80} = 634,4 \approx 635 \text{ ks} \quad (4.1)$$

kde: n_t – počet tabulí [ks],
 v_s – výrobní série [ks],
 n_{ks} – počet polotovarů z tabule [ks].

Potřebný počet tabulí plechu k výrobě požadované série tedy je 635 kusů. Takové množství tabulí bude vyjít na cenu:

$$C_{ct} = n_t \cdot C_t = 635 \cdot 2\,178 = 1\,383\,030 \text{ Kč} \quad (4.2)$$

kde: C_{ct} – celková cena tabulí [Kč],
 C_t – cena jedné tabule [Kč].

Množství odpadu nakoupeného materiálu se určí:

$$m_o = m_t \cdot \left(1 - \frac{\mu}{100}\right) \cdot n_t = 89 \cdot \left(1 - \frac{95,36}{100}\right) \cdot 635 = 2\,622,3 \text{ kg} \quad (4.3)$$

kde: m_o – hmotnost odpadu [kg].

Odpadový materiál se vykupuje za cenu 3 koruny za kilogram. Cenu odpadu je tedy možno stanovit:

$$C_{co} = m_o \cdot C_o = 2\,622,3 \cdot 3 = 7\,866,90 \text{ Kč} \quad (4.4)$$

kde: C_o – cena odpadu [$\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$].

Celková cena za materiál se vypočítá následovně:

$$C_c = C_{ct} + C_{co} = 1\,383\,030 + 7\,866,90 = 1\,390\,896,90 \text{ Kč} \quad (4.5)$$

kde: C_c – celková cena materiálu [Kč].

Celková cena materiál tedy je 1 390 896,90 Kč.

Náklady na pořízení nástroje – pro jejich určení je nezbytné určit cenu použitých materiálů, které jsou uvedeny v tabulce 15.

Tab. 15 Náklady na materiál nástroje

Třída oceli	Množství [kg]	Cena za 1 kg [Kč]	Celková cena [Kč]
11	532,61	31	16 510,9
12	84,94	34	2 887,8
19	95,38	118	11 254,2
Cena za materiál celkem [Kč]		30 653	

Čas výroby nástroje byl odhadnut na 500 hodin. Mzda nástrojáře bude uvažována na 190 Kč za hodinu. Celková mzda tedy je:

$$M_n = H_n \cdot t_v = 190 \cdot 500 = 95\,000 \text{ Kč} \quad (4.6)$$

kde: M_n – mzda nástrojáře za výrobu nástroje [Kč],
 H_n – hodinová mzda nástrojáře [Kč],
 t_v – čas výroby nástroje [hod].

Do ceny nástroje je potřeba také zahrnout zpracovatelské režie, které byly odhadnuty na 500 % mzdy nástrojáře pro výrobu nástroje:

$$Z_r = M_n \cdot 5 = 95\,000 \cdot 5 = 475\,000 \text{ Kč} \quad (4.7)$$

kde: Z_r – zpracovatelská režie [Kč].

Na cenu nástroje má taky vliv výše zisku výrobce. Ta byla odhadnuta na 20% zpracovatelské režie:

$$Z_v = Z_r \cdot 0,2 = 475\,000 \cdot 0,2 = 95\,000 \text{ Kč} \quad (4.8)$$

kde: Z_v – zisk výrobce [Kč].

Celková cena nástroje je pak rovna součtu ceny materiálu, zpracovatelských režii a zisku výrobce:

$$C_{cn} = C_m + Z_r + Z_v = 30\,653 + 475\,000 + 95\,000 = 600\,653 \text{ Kč} \quad (4.9)$$

kde: C_{cn} – celková cena nástroje [Kč].

Do nákladů je důležité zahrnout náklady na elektrickou energii lisu CTH 250. Průměrná cena energie je 4,91 Kč za kWh. Pro výpočet spotřeby energie je nutné znát čas výroby série. Pro výpočet byl odhadnut čas tváření a založení materiálu pro další tah na dobu $t_z = 45$ s:

$$T_v = \frac{t_z \cdot n_d}{3\,600} = \frac{45 \cdot 50\,750}{3\,600} = 634,4 \text{ hod} \quad (4.10)$$

kde: T_v – čas výroby série [hod],
 t_z – čas jednoho zdvihu lisu [s],
 n_d – počet vyráběných dílů [ks].

Příkon stroje není v katalogu výrobce uveden, proto bude počítáno s jeho výkonem dle tabulky 12:

$$C_e = T_v \cdot P_s \cdot C_{1kWh} = 634,4 \cdot 55 \cdot 4,91 = 171\,319,70 \text{ Kč} \quad (4.11)$$

kde: C_e – cena energie [Kč],
 P_s – výkon stroje [kW],
 C_{1kWh} – cena 1 kWh [Kč].

Mzda pracovníka byla zvolena dle první skupiny prací. Jedná se o jednoduchou pracovní úlohu s jednoduchými pracovními pomůckami. Pro byla zvolena minimální superhrubá mzda, při které cena hodinové práce je hodnocena 116,90 Kč. Náklady na mzdu pracovníka se pak spočítají:

$$M_p = T_v \cdot C_p = 634,4 \cdot 116,90 = 74\,161,40 \text{ Kč} \quad (4.12)$$

kde: M_p – mzda pracovníka [Kč],
 C_p – hodinová mzda pracovníka [Kč·hod⁻¹].

Následně je nutné stanovit režijní náklady, především pro správní režii, výrobní a odbytovou. Hodnoty těchto nákladů budou stanoveny procentuálně ze mzdy pracovníka. Režijní náklady lze vypočítat dle následujícího vzorce:

$$N_R = M_p \cdot \left(\frac{SR}{100} + \frac{VR}{100} + \frac{OR}{100} \right) \quad (4.13)$$

kde: N_R – režijní náklady [Kč],
 SR – správní režie [%],
 VR – výrobní režie [%],
 OR – odbytová režie [%].

Hodnota správní režie byla určena na 115 % z mezd, výrobní na 350 % a odbytová na 90 %. Po dosazení pak dostáváme:

$$N_R = 74\,161,40 \cdot \left(\frac{115}{100} + \frac{350}{100} + \frac{90}{100} \right) = 411\,595,80 \text{ Kč}$$

Z výše vypočítaných hodnot je třeba určit fixní náklady, do kterých bude zahrnuta pouze cena nástroje. Fixní náklady jsou teda ve výši $N_{\text{fix}} = 600\,653 \text{ Kč}$.

Do variabilních nákladů budou zahrnuty režijní náklady, mzda pracovníka, náklady na materiál a elektrickou energii:

$$N_{\text{var}} = N_R + M_p + C_c + C_e \quad (4.14)$$

kde: N_{var} – variabilní náklady [Kč].

Po dosazení pak:

$$N_{\text{var}} = 411\,595,80 + 74\,161,40 + 171\,319,70 + 1\,375\,163,10 = 2\,322\,240 \text{ Kč}$$

Variabilní náklady na jeden kus:

$$N_{\text{varj}} = \frac{N_{\text{var}}}{v_s} = \frac{2\,322\,240}{50\,000} = 40,70 \text{ Kč} \quad (4.15)$$

kde: N_{varj} – variabilní náklady na jeden kus [Kč].

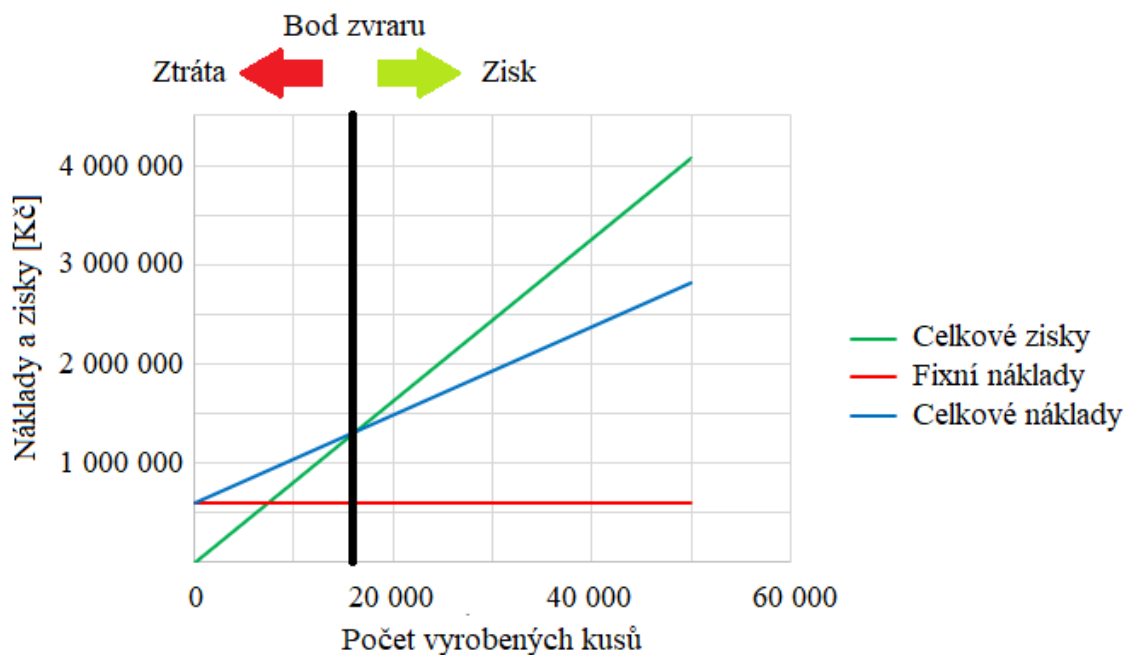
K vypočítané ceně jednoho kusu je třeba určit zisk, který bude činit 100 %. Konečná cena jednoho kusu tedy je:

$$C_k = N_{\text{varj}} \cdot 2 = 40,70 \cdot 2 = 81,50 \text{ Kč} \quad (4.16)$$

K celkovému hodnocení výroby je nutné vypočítat bod zvratu. Jedná se o počet kusů, po jehož překročení se výroba stává zisková. Bod zvratu je vyroben fixními i variabilními náklady. Tento bod se určí dle následujícího vztahu:

$$BZ = \frac{N_{\text{fix}}}{C_k - N_{\text{varj}}} = \frac{600\,653}{81,50 - 40,70} = 14\,722 \text{ ks} \quad (4.17)$$

Bod zvratu je znázorněn na přiloženém grafu na obrázku 64.



Obr. 65 Bod zvratu

Cílem ekonomického hodnocení bylo zjistit náklady spojené s tvářením krytu kloubu. Byla tedy vypočítána cena materiálu ve výši 1 375 163,10 Kč. Dále byla stanovena cena nástroje na 600 653 Kč. Variabilní náklady spojené s výrobou byly určeny na 2 322 240 Kč. Z výše uvedených výpočtů plyne, že bod zvratu nastává při výrobě 14 722 kusů, kdy celkové zisky dorovnají celkové náklady a pokračující výrobou je začínají převyšovat. Do prodejní ceny se dále promítne cena ostřížení a povrchové úpravy součástí.

5 ZÁVĚRY

Cílem práce bylo zpracovat návrh výroby krytu tažného kloubu. Součást bude vyráběna z oceli 11 320 v množství 50 000 kusů. Součást musí odolávat povětrnostním vlivům, a proto bude žárově zinkována. Z několika možných technologií výroby byla zvolena technologie hlubokého tažení.

Při návrhu technologie výroby byly dodrženy pravidla pro zhotovení daného výtažku. Jako první byla určena velikost polotovaru 298 x 180 mm, který bude zhotoven řezáním pomocí laseru z tabulí plechu 3000 x 1500 mm o tloušťce 2,5 mm. Bylo určeno, že se bude táhnout v jednom tahu. Využití materiálu bylo spočítáno na 95,36 %. Základní tvar součásti lze zhotovit s použitím přidržovače v jednom tahu. Velikost tažné vůle pro tento tah byla určena $z_1 = 3,25$ mm.

Celková tažná síla potřebná pro jeden zdvih nástroje byla stanovena na $F = 438,4$ kN. S ohledem na požadovanou sílu a velikost nástroje byl pro výrobu zvolen hydraulický lis CTH 250 do firmy ŽĎAS a.s. s přídatnými spodními vyhazovači. Tento lis disponuje tvářecí silou 2 500 kN. Dle technologických výpočtů a z důvodu vyšší produktivity byl pro výrobu navržen postupový nástroj se čtyřmi operacemi.

Pro navrženou technologii výroby byla provedena numerická simulace. Dle výsledků bylo pro výrobu vhodné zvětšení zaoblení přechodu mezi výtažkem a přírubou a taky mezi výtažkem a lemem. To bude mít z následek lepší tečení materiálu a tím by nemuselo docházet k tak vysokým hodnotám kritéria FLD a celý proces výroby by byl bezpečnější.

V poslední kapitole bylo provedeno technicko – ekonomické hodnocení výroby. Zahrnuty byly pouze náklady na výrobu tvářením. Byla stanovena výše fixních nákladů v hodnotě 600 653 Kč a nákladů variabilních 2 322 240 Kč. Bod zvratu byl vypočítán při výrobě 14 722 ks. Ze zahrnutých nákladů byla stanovena cena dílce na 81,50 Kč.

Dle provedených simulací je kryt tažného kloubu navrženou technologií vyrobitelný. Před zavedením navržené technologie do výroby je třeba provést ověřovací sérii.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [45]

1. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s.: obr., tabulky, grafy. ISBN 978-80-214-4747-9.
2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
3. MACHÁČEK, Zdeněk a Karel NOVOTNÝ. *Speciální technologie I: plošné a objemové tváření*. Brno: VUT Brno, 1986.
4. *Koupelny Ptáček* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.koupelny-ptacek.cz/drez-nerezovy-franke-s-odkapavacem-mikado-mon-681-e-960x500mm-nerez>
5. *Matum Alpine* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.matum.cz/miska-z-nerezove-oceli-nestig-bowl-5572>
6. *Alibaba.com Online Trade Show* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: https://french.alibaba.com/product-detail/yangzhou-baohong-factory-wholesale-car-auto-body-spare-parts-back-door-trunk-lid-for-camry-2015-usa-version-64401-06a70-62032363296.html?spm=a2700.md_fr_FR.deiletai6.3.761732cctZIG3K
7. *VAPP přívěsy a příslušenství* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: https://www.vapp.cz/detail/basic-2?gclid=EAIaIQobChMI45iRifrO5wIVDLtCh1xRg8_EAQYASABEgK_q_D_BwE
8. *UNITRAILER Vše pro přívěsné vozíky* [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://unitrailer.cz/product-cze-186-Kloub-tazny-pro-prives-Steelpress-ZSK-750-H-800.html>
9. *ČSN 41 1320, Ocel 11 320*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1994.
10. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: STU, 2010. ISBN 978-80-227-3242-0.
11. *KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/tvareni-kovu>
12. ROMANOVSKIJ, Viktor Petrovič. *Příručka pro lisování za studena*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959.
13. ČADA, Radek. *Technologie I: objemové a plošné tváření za studena (návod do cvičení)*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2126-9.
14. ŠPAČEK, Jindřich a Ladislav ŽÁK. *Speciální technologie I a II: návody do cvičení-část: plošné tváření*. Brno: Vysoké učení technické, 1991. ISBN 80-214-0259-8.
15. *ČSN 22 7301. Lisovací nástroje. tažení dutých válcových výtazků. Směrnice pro konstrukci*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1991.
16. NOVOTNÝ, Karel. *Výrobní stroje a zařízení, část tvářecí stroje. Ústav strojírenské technologie* [online]. 2002 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/hvs_vyrobnni_stroje_a_zarizeni_novotny.pdf

17. BAREŠ, Karel, Karel DÍTĚ, Vladimír HAŠEK, František HRAZDIL, Rudolf HÝSEK, Miroslav KOŘÍNEK, Vladimír KRAUS, Jaroslav KRYŠTOF, Viktor MIKEŠ, Jindřich NĚMEC, Jiří PACHL, Jaroslav SMRČKA, František SOMMER, Bohumil STEJSKAL, Oldřich STŘEDA, Emil ŠKRABAL, Jaroslav TMĚJ, Miroslav VANĚK a Jaroslav VRTĚL. *Lisování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1971.
18. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0401-9.
19. TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE. *Hluboké tažení plechu na lisech*. Praha: STNL-Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00221-4.
20. *LaO Lasery a Optika* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
21. *Hydraulické lisy ŽĎAS* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.industry-eu.cz/files/companies/890388.pdf>
22. *WASHINA engineering s.r.o.* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://dodavatele.epoptavka.cz/1317335-washina-engineering-s-r-o/nabidka/533335-vrtani-kovu>
23. *Technologie využívající laser* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf
24. HUMÁR, Antonín. *TECHNOLOGIE I Technologie obrábění - 2. část*. Brno: Vysoké učení technické, 2004.
25. KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-01-01003-1.
26. LIDMILA, Zdeněk. *Přípravky a nástroje*. Přednáška Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 9.4.2019
27. *ArcelorMittal Ploché výrobky válcované za tepla* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://ds.arcelormittal.com/repository/ostrava/AM_katalog-ploche-cz.pdf
28. *Ferona Online* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/>
29. *KONDOR Hutní materiály* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.kondor.cz/>
30. MACHÁLEK, Jakub, Radek ČADA a Barbora FRODLOVÁ. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru PAM-STAMP 2G*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2715-5.
31. ŘIHÁČEK, Jan. *Využití hydroformingu při vytváření strukturovaného povrchu solárního panelu*. Brno, 2018. Dizertační práce. VUT FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.
32. *Pacific Engineering Systems International* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.esi.com.au/software/pamstamp/>
33. *HENLLICH s.r.o.* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/pruziny-tlacne-pruziny-162/tlacne-pruziny-z-pruzinove-oceli.html>

34. ČSN22 6015. *Lisovací nástroje. Stříhadla a střížné vřle. Směrnice pro výpočet a konstrukci.* Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1975.
35. ČSN 22 6215. *Lisovací nástroje. Vodící lité stojánky s pracovní plochou obdélníkovou se sloupky za pracovní plochou.* Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1983.
36. ČSN 22 6264. *Lisovací nástroje. Stopky lisovacích nástrojů pro tváření bez ohřevu.* Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1974.
37. ČSN22 7303. *Lisovací nástroje. Tažení dutých čtyřhranných výtazků. Směrnice pro konstrukci.* Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1989.
38. Šmeral Brno a.s. [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.smeral.cz/>
39. Barko s.r.o. [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.druhotnesuroviny.cz/cenik-kovu/cenik-zeleza-zelezneho-srotu.htm>
40. Energie123.cz [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>
41. Kurzy.cz [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kalkulacka/minimalni-mzda/>
42. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechnics and metallurgy.* 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.
43. LOGAN, Daryl L. *A first course in the finite element method.* 6th ed. Australia: Cengage learning. ISBN 978-1-305-63734-4.
44. ResearchGate [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236156408_Theoretical_analysis_of_strain_and_stress-based_forming_limit_diagrams
45. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažná práce	[J]
A_i	Práce v i-té operaci	[J]
a_i	Rozměry rovných částí hranaté části výtažku	[mm]
a_c	Celková šířka polotovaru	[mm]
b	Součinitel neutrální plochy	[-]
b_h	Délka hranaté části výtažku	[mm]
C_{1kWh}	Cena 1kWh	[Kč]
C_c	Celková cena materiálu	[Kč]
C_{co}	Celková cena odpadu	[Kč]
C_{cn}	Celková cena nástroje	[Kč]
C_{ct}	Celková cena tabulí	[Kč]
C_e	Cena energie	[Kč]
C_k	Konečná cena jednoho kusu	[Kč]
C_o	Cena odpadu	[Kč]
C_t	Cena tabulí	[Kč]
c	Součinitel vyjadřující vliv součinitele tažení 'm'	[-]
D	Průměr přístřihu při tažení	[mm]
D_z	Průměr středu zaoblení	[mm]
d_i	Průměr výtažku v i-té operaci	[mm]
d_k	Průměr kulové plochy	[mm]
d_h	Průměr hotového výtažku	[mm]
d_{st}	Průměr střižníku	[mm]
d_{10}	Průmět technologického otvoru	[mm]
d_v	Průměr válcové plochy	[mm]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
e^{fa}	Součinitel opásání tažné hrany	[-]
F	Síla pro jeden zdvih nástroje	[N]
F_1	Síla pro první operaci	[N]
F_2	Síla pro druhou operaci	[N]
F_3	Síla pro třetí operaci	[N]
F_4	Síla pro čtvrtou operaci	[N]
F_c	Celková tažná síla	[N]
F_{krit}	Kritická síla na utržení dna	[N]
F_l	Lemovací síla	[N]
F_o	Síla na ohyb rovných stěn	[N]
F_{ol}	Ohybová síla lemování	[N]
F_p	Přidržovací síla	[N]
F_{pr}	Síla pružiny	[N]
F_s	Střižná síla	[N]
F_{si}	Střižná síla i-tého střižníku	[N]
F_t	Tažná síla k vytažení zaoblení	[N]
F_{t1}	Tažná síla pro první operaci	[N]
F_{t4}	Tažná síla pro čtvrtou operaci	[N]
F_{t4l}	Tažná síla čtvrté operace lisu	[N]
F_{tl}	Tažná síla lemování	[N]
F_v	Síla od vyhazovače	[N]
f	Součinitel tření	[-]

Označení	Legenda	Jednotka
H	Celková výška lemu	[mm]
H _n	Hodinová mzda nástrojáře	[Kč]
h	Pracovní zdvih	[mm]
h _i	Výška výtažku v i-té operaci	[mm]
h _{pl}	Šířka tabule plechu	[mm]
h _{po}	Šířka polotovaru	[mm]
h _v	Výška válcové plochy	[mm]
i _{po}	Počet polotovarů na tabuli plechu	[ks]
J _s	Osový moment setrvačnosti	[mm ⁴]
K _i	Stupeň tažení v i-té operaci	[-]
k	Koeficient závislý na druhu a tloušťce materiálu	[-]
k _d	Tažný odpor	[MPa]
k _l	Koeficient respektující průběh lemovací síly	[-]
k _o	Opravný koeficient	[-]
L	Délka tvořící křivky	[mm]
l	Délka oblouku neutrální plochy	[mm]
l _{1,2}	Délky lemovaných hran	[mm]
l _{1s,2s}	Délky hran stříhaného otvoru	[mm]
l _{hč}	Délka hranaté části výtažku	[mm]
l _i	Délka úseku	[mm]
l _{is}	Délky hran stříhaných otvorů	[mm]
l _{pl}	Délka tabule plechu	[mm]
l _{po}	Délka polotovaru	[mm]
l _{sikrit}	Kritická délka i-tého střížníku	[mm]
l _t	Délka technologického otvoru	[mm]
M _n	Mzda nástrojáře za výrobu nástroje	[Kč]
M _o	Ohybový moment	[N · m]
M _p	Mzda pracovníka	[Kč]
m _i	Součinitel tažení v i-té operaci	[-]
m _o	Hmotnost odpadu	[kg]
m _t	Hmotnost tabule	[kg]
N _{fix}	Fixní náklady	[Kč]
N _r	Režijní náklady	[Kč]
N _{var}	Variabilní náklady	[Kč]
N _{varj}	Variabilní náklady jednoho kusu	[Kč]
n	Počet tahů	[-]
n _d	Počet vyráběných dílů	[ks]
n _{ks}	Počet polotovarů z jedné tabule	[ks]
n _t	Počet tabulí	[ks]
O _d	Obvod dna	[mm]
P	Poměrná tloušťka	[%]
P _s	Výkon stroje	[kW]
p _p	Tlak přidržovače	[MPa]
q	Materiálová konstanta	[-]
R	Poloměr polotovaru	[mm]
R _m	Mez pevnosti materiálu	[MPa]
R _p	Poloměr vnějšího okraje příruby	[mm]
R _{pr}	Tuhost pružiny	[N · mm ⁻¹]
R _{př}	Poloměr přístřihu sférické části	[mm]

Označení	Legenda	Jednotka
R_s	Vzdálenost těžiště tvořící křivky od osy	[mm]
R_{te}	Poloměr zaoblení tažné hrany	[mm]
R_p	Střední poloměr	[mm]
r	Poloměr zaoblení plochy S_3	[mm]
$r_{1,2}$	Zaoblení hranaté části výtažku	[mm]
r_i	Vzdálenost těžiště	[mm]
r_l	Poloměr zaoblení lemu	[mm]
r_o	Poloměr ohybu	[mm]
r_p	Poloměr vnitřního okraje příruby	[mm]
r_{oi}	Poloměr i-tého zaoblení	[mm]
r_r	Zaoblení rohu stříhaného otvoru	[mm]
r_{tc}	Poloměr tažnice	[mm]
r_{tv}	Poloměr zaoblení tažníku	[mm]
S	Plocha stříhu	[mm ²]
S_h	Plocha hranaté části výtažku	[mm ²]
S_i	I-tá plocha výtažku	[mm ²]
S_p	Plocha přidržovače	[mm ²]
S_{pl}	Plocha tabule plechu	[mm ²]
S_{po}	Plocha polotovaru	[mm ²]
S_s	Plocha sférické části výtažku	[mm ²]
S_v	Povrch výtažku	[mm ²]
s	Konečná tloušťka výtažku	[mm]
s_o	Tloušťka polotovaru	[mm]
s_t	Šířka technologického otvoru	[mm]
T_v	Čas výroby série	[hod]
t	Šířka nástroje	[mm]
t_v	Čas výroby nástroje	[hod]
t_z	Čas zdvihu nástroje	[s]
u	Součinitel	[-]
v	Výška kulové plochy	[mm]
v_s	Výrobní série	[ks]
x	Stlačení pružiny	[mm]
Z_r	Zpracovatelská režie	[Kč]
Z_v	Zisk výrobce	[Kč]
z	Tažná mezera	[mm]
z_1	Tažná mezera v prvním tahu	[mm]
z_k	Tažná mezera při kalibraci	[mm]
z_n	Tažná mezera v posledním tahu	[mm]
α	Úhel pootočení	[°]
β	Úhel klínu	[°]
γ	Úhel ohnutého úseku	[°]
Δ_{lp}	Stlačení pružiny	[mm]
δ	Třecí úhel	[°]
ε_i	Poměrné přetvoření pro i-tou operaci	[-]
μ	Procentuální využití materiálu	[%]
ζ	Lodeho součinitel	[-]

Označení	Legenda	Jednotka
ρ	Obecný poloměr polotovaru	[mm]
ρ_0	Poloměr neutrální osy	[mm]
ρ_{0i}	Poloměr neutrální i-té plochy	[mm]
σ_1	Radiální tahové napětí	[MPa]
σ_2	Osové tlakové napětí	[MPa]
σ_3	Tangenciální tlakové napětí	[MPa]
σ_d	Deformační odpor	[MPa]
σ_f	Napětí vzniklé třením od přídržovače	[MPa]
σ_o	Ohybové napětí	[MPa]
σ_p	Přirozený přetvárný odpor	[MPa]
σ_{ps}	Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu	[MPa]
σ_t	Tangenciální napětí	[MPa]
σ_r	Radiální napětí	[MPa]
φ_i	Hlavní logaritmické přetvoření	[-]
ψ	Koeficient plnosti diagramu	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady součástí vyrobených tažením [4], [5], [6]	9
Obr. 2 Kryt tažného kloubu	10
Obr. 3 Základní rozměry součásti	10
Obr. 4 Přívěsný vozík	10
Obr. 5 Hydroform [11]	11
Obr. 6 Hydromechanické tažení [11]	12
Obr. 7 Marform [11]	12
Obr. 8 Hluboké tažení [11]	13
Obr. 9 Vrtání [22]	13
Obr. 10 Princip laseru [20]	14
Obr. 11 Schéma konvenčního tažného nástroje [11]	15
Obr. 12 Schéma napjatosti s deformace [2]	15
Obr. 13 První operace tažení s přidržovačem a průběh logaritmických deformací po délce rozvinuté povrchy [2]	16
Obr. 14 Rozbor ploch [12]	18
Obr. 15 Příklad výpočtu [10]	19
Obr. 16 Grafický způsob určení polotovaru [12]	19
Obr. 17 Postup víceoperačního tažení [2]	20
Obr. 18 Mezní hodnoty součinitele tažení [12]	20
Obr. 19 Tažná mezera [2]	21
Obr. 20 Průběh tažné síly [3]	23
Obr. 21 Tažný nástroj [26]	24
Obr. 22 Tažidla pro první tahy [25]	25
Obr. 23 Konstrukce tažníků pro více tahů [25]	25
Obr. 24 Konstrukce tažníků [2]	26
Obr. 25 Konstrukce tažnic [13]	27
Obr. 26 Konstrukce tažných hran [2]	27
Obr. 27 Brzdící žebra [18]	28
Obr. 28 Konstrukce přidržovačů [2]	28
Obr. 29 Schéma hydraulického lisu [16]	30
Obr. 30 Schéma klikového lisu [16]	30
Obr. 31 Průběh síly, rychlosti, zrychlení a dráhy [16]	30
Obr. 32 Schéma napětí válcového a hranatého výtažku [3]	32
Obr. 33 Deformace souřadné sítě [1]	32
Obr. 34 Schéma tažené a napjatosti u sférického výtažku [3]	32
Obr. 35 Tažení s brzdící lištou [3]	33
Obr. 36 Příklad prvků sítě MKP [31]	33
Obr. 37 Výsledky simulace PAM-STAMP [30]	33
Obr. 38 Přejít mezi průměry [10]	34
Obr. 39 Sestava tažného kloubu	35
Obr. 40 Znárodnění vypouklé části	35
Obr. 41 Rozdělení hranaté části na plochy 'S _i '	35
Obr. 42 Rozdělení sférické části	36
Obr. 43 Nářezový plán příčného uložení na tabuli 2000 x 1000	38
Obr. 44 Porovnání tažení kruhové a nekruhové nádoby [14]	39
Obr. 45 Znárodnění vzdálenosti 'b _n '	40
Obr. 46 Závislost rozměru 'b _n ' na poloměru 'r/B' a počtu tahů [12]	40
Obr. 47 Rozměry k výpočtu lemování [17]	42

Obr. 48 Hydraulický lis CTH [21]	46
Obr. 49 Nástroj v otevřeném stavu.....	47
Obr. 50 První operace.....	48
Obr. 51 Druhá operace	49
Obr. 52 Třetí operace.....	51
Obr. 53 Čtvrtá operace	52
Obr. 54 Geometrický model první operace	53
Obr. 55 Schéma znázornění K-G diagramu mezní tvařitelnosti [44].....	54
Obr. 56 První operace - tažení	54
Obr. 57 FLD první operace.....	55
Obr. 58 Druhá operace - stříhání.....	55
Obr. 59 Třetí operace - lemování	55
Obr. 60 FLD třetí operace.....	56
Obr. 61 Čtvrtá operace - tažení	56
Obr. 62 FLD čtvrtá operace	57
Obr. 63 Pátá operace - ostřížení	57
Obr. 64 FLD pátá operace	58
Obr. 65 Bod zvratu	62

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Mechanické vlastnosti oceli 11 320 [9].....	11
Tab. 2	Chemické složení oceli 11 320 [9].....	11
Tab. 3	Zaoblení tažné hrany tažníku [3].....	21
Tab. 4	Materiálové konstanty [13].....	22
Tab. 5	Vybrané hodnoty součinitele 'c' [10].....	23
Tab. 6	Hodnoty tlaku přidržovače 'p _p ' [12].....	24
Tab. 7	Materiály tažných nástrojů [2].....	29
Tab. 8	Přídavky na ostřížení výtažku [14].....	38
Tab. 9	Souhrn výsledků využitelnosti tabulí	39
Tab. 10	Hodnoty součinitele tažení 'm ₁ ' pro tažení oválných nádob [17].....	40
Tab. 11	Hodnoty koeficientu k [17].....	45
Tab. 12	Základní technické parametry lisu CTH 250 [21].....	46
Tab. 13	Hodnoty pro výpočet funkčních rozměrů střižných nástrojů [37]	50
Tab. 14	Funkční rozměry nástrojů	50
Tab. 15	Náklady na materiál nástroje.....	60

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Deformace předřezaného hranatého otvoru v první operaci

SEZNAM VÝKRESŮ

Kryt tažného kloubu	2020-DP-171088-1
Nástroj	2020-DP-171088-2
Kusovník 1/4	2020-DP-171088-2.1
Kusovník 2/4	2020-DP-171088-2.2
Kusovník 3/4	2020-DP-171088-2.3
Kusovník 4/4	2020-DP-171088-2.4
Tažník 1	2020-DP-171088-3
Tažnice 1	2020-DP-171088-4
Lisovník	2020-DP-171088-5
Lisovnice	2020-DP-171088-6
Tažník 2	2020-DP-171088-7
Střižník 2	2020-DP-171088-8

